

HIILIDIOKSIDIKYLMÄJÄRJESTELMÄN ENERGIASEURANTA JA TOIMINNAN KEHITTÄMINEN LÄHIKAUPASSA

Jetitek Oy

Miikka Mäkitalo

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennustekniikka
Insinööri (AMK)

2015

Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennustekniikka

Tekijä	Miikka Mäkitalo	Vuosi	2015
Ohjaaja	Petri Kuisma		
Toimeksiantaja	Jetitek Oy		
Työn nimi	Hiilidioksidikylmäjärjestelmän energiaseuranta ja toiminnan kehittämien lähikaupassa		
Sivu- ja liitemäärä	62 + 4		

Opinnäytetyössä tutkittiin ruokakauppaan asennetun hiilidioksidilla toimivan kylmälaitteiston toimintaa. Suurin ero perinteisen ja tutkittavan laitteiston välillä on tutkittavan järjestelmän lauhdutukseen ja lisälämmöntuotantoon käytettävät porakaivot. Tutkimusongelmana oli selvittää hiilidioksidilaitteiston sekä sen yhteyteen rakennettujen energian talteenottojärjestelmien toimivuutta ja hyötysuhteita. Tarkoituksena oli kartoittaa uuden tekniikan tuomia hyötyjä mitatun datan avulla. Työssä tarkastellaan laitteiston toimintaa Suomen vaihtelevissa oloissa. Opinnäytetyössä käydään läpi hiilidioksidilla toimivan kylmälaitteiston toimintaperiaatetta.

Opinnäytetyö perustuu järjestelmän kehittäjien (Jetitek Oy) antamiin tietoihin sekä järjestelmään asennettujen lämpötila- sekä virtausmittauksiin. Järjestelmän uutuuden vuoksi täsmällisiä kirjalähteitä ei ole saatavilla. Järjestelmässä käytetystä tekniikasta ei ole vielä tehty tämän opinnäytetyön kaltaista tutkimusta, jossa järjestelmän energiankulutuksesta saataisiin mittausdatan perusteella faktatietoa.

Työprojektin alkaessa oletuksena oli, että kylmä- ja lämmitysjärjestelmän kuluttama sähköenergia olisi noin puolet perinteisellä ratkaisulla toteutetun järjestelmän energiankulutuksesta. Työssä tälle oletukselle saatiin mittaustuloksiin perustuvaa näyttöä ja oletus todistettiin paikkansa pitäväksi. Ottaen huomioon järjestelmässä olevat pienet ongelmat, koneikon voitaisiin ajatella kuluttavan jopa vieläkin vähemmän optimiolosuhteissa. Opinnäytetyöprosessin aikana pystyttiin puuttumaan laitteiston ongelmakohtiin ja niitä saatiin korjattua. Myös laitteiston toimintaa kehittäviä ideoita pystyttiin esittämään työssä.

Asiasanat

hiilidioksidi, kylmäjärjestelmä, porakaivo, lähikauppa, energiaseuranta, toiminnan kehittäminen

School of Technology
Construction Engineering
Programme

Author	Miikka Mäkitalo	Year	2015
Supervisor(s)	Petri Kuisma		
Commissioned by	Jetitek Oy		
Subject of thesis	Energy Monitoring and System Development of Carbon Dioxide Refrigeration System in a Grocery Shop Environment		
Number of pages	62 + 4		

Carbon dioxide refrigeration in a grocery shop was studied in this thesis. The main goal was to explore the energy consumption of the refrigeration center and heat recovery system built into it. One of the purposes was to define the best settings to similar facilities on future. Because this thesis was done during the winter, all the results aimed at better energy consumption in cold climate conditions. Also carbon dioxide in refrigeration was introduced.

This thesis was based on information given by its Jetitek Oy, the system developer. Also heat and flow measurements done specially for the heat recovery of this system were used in this thesis. Information available for this thesis was really restricted, because this system is unique and quite new. There is no energy consumption facts based on accurate measurements for facilities like this. However, this thesis will provide that.

The hypothesis of energy consumption of the grocery shop was that it uses half of the energy that a conventional grocery shop refrigeration and heating system. During the winter the consumption figures showed that the claim was true. In addition minor problems in the system were discovered and they are taken in the consideration in the design of carbon dioxide systems.

Key words carbon dioxide, refrigeration system, drilled wells, grocery shop, energy monitoring, system development

SISÄLLYS

KUVIOT JA TAULUKOT

ALKUSANAT

1	JOHDANTO	9
2	KYLMÄPROSESSI JA HIILIDIOKSIDI	11
2.1	Kylmäprosessi	11
2.1.1	Alikriittinen prosessi	14
2.1.2	Ylikriittinen prosessi	14
2.2	Kylmäaineet	15
2.3	Hiilidioksidi kylmäaineena	15
2.3.1	Hiilidioksidikylmäkoneen toiminta ylikriittisenä	17
2.3.2	Optimaalinen käyntipaine ylikriittisenä	19
2.3.3	Hiilidioksidin haasteet kylmäainekäytössä	19
2.3.4	Hiilidioksidin ympäristövaikutukset	20
2.4	Lauhdelämpö	20
3	KAUPAN KYLMÄ	22
3.1	Kauppojen energiankulutus	22
3.2	Yleistä kaupan kylmästä	23
3.3	Hiilidioksidi kaupan kylmässä	24
3.4	Lämmöntalteenotto kaupan kylmässä	27
3.5	Lauhdelämmön tasot	30
4	TUTKITTAVAN JÄRJESTELMÄN ESITTELY JA SEN OSAT	33
4.1	Järjestelmän perustiedot	33
4.2	Kylmäkoneikko	33
4.2.1	Kompressorit	34
4.2.2	Lämmönvaihtimet	34
4.2.3	Rakennuksen lämmitys	34
4.2.4	Porakaivot	35
4.3	Lisälämmön tuotanto	35
4.4	Järjestelmän kytkennät	36
4.4.1	Lämmönvaihtimet HE10, HE20 ja HE130	37
4.4.2	Lämmönvaihdin HE40	37
4.4.3	Maapiiri ja lämmönvaihdin HE60	38

4.4.4	Lämmönvaihtimet HE50 ja HE80	38
4.4.5	Paineenalennusventtiilit.....	38
5	MITTAUKSET	40
5.1	Mittausten tavoite.....	40
5.2	Mittauskohdat	40
5.3	Laskelmat	41
5.4	Testiajot	42
5.4.1	Testiajo 1.....	42
5.4.2	Testiajo 2.....	44
5.4.3	Talven testiajoissa saatuja kulutuslukemia.....	46
5.5	Testiajoissa havaittuja ongelmia järjestelmässä	47
5.5.1	HE20-lämmönvaihtimen lämpötilaero.....	47
5.5.2	Lämpöenergian turha kierrättäminen.....	48
5.5.3	Puskurivaraajan lämpötila ei nouse.....	49
5.6	Parannusehdotukset.....	50
5.6.1	Puskurivaraajan kytkentä	50
5.6.2	Ovipuhaltimien säätöventtiilit	51
5.6.3	Välilevyllinen puskurivaraaja	52
5.6.4	HE20- ja HE130-lämmönvaihtimien kiertopumpun ohjaus	53
5.6.5	HE60-lämmönvaihtimen käyttö	53
5.7	Viitekehyksiä samantyyppisille kylmäjärjestelmille.....	54
5.7.1	Lämpötilaero HE20-lämmönvaihtimella.....	54
5.7.2	Lämpötila kaasunjäähdyttimen jälkeen.....	55
5.7.3	Optimaalinen lauhduspaine lisälämmöntuotannossa	56
6	POHDINTA	58
	LÄHTEET	61
	LIITTEET	62

KUVIOT JA TAULUKOT

Kuvio 1	Lämpöpumppu	11
Kuvio 2	Log p, h -piirros	12
Kuvio 3	Kylmäprosessi log p, h -piirroksessa.....	13
Kuvio 4	Alikriittinen kiertoprosessi.....	14
Kuvio 5	Ylikriittinen kiertoprosessi.....	14
Kuvio 6	Hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti.....	18
Kuvio 7	Hiilidioksidikylmäkoneen COP lauhtumispaineen funktiona.....	18
Kuvio 8	Käyntipaineen vaikutus höyrystimen tehoon hiilidioksidilla.....	19
Kuvio 9	Myyvälän energiankulutuksen jakautuminen.....	23
Kuvio 10	Erilliskoneisto.....	25
Kuvio 11	KaskadikytKentä.....	26
Kuvio 12	Booster-kytKentä.....	27
Kuvio 13	Välillinen LTO.....	28
Kuvio 14	Suora LTO.....	29
Kuvio 15	Lämpöpumppu LTO.....	30
Kuvio 16	Alijäähdytyksen vaikutus kiertoon.....	32
Kuvio 17	Tutkittavan järjestelmän periaatteellinen kytKentä.....	36
Kuvio 18	Tämänhetkinen lämmönjako myymälässä.....	50
Kuvio 19	KytKentä suoraan varaajaan.....	51
Kuvio 20	Paineenkorotuksen vaikutus hyödynnettävään energiaan.....	56
Taulukko 1	Hiilidioksidin ominaisuuksia.....	16
Taulukko 2	Myyvälöiden energiankulutus	22
Taulukko 3	Testiajo 1:n verrattuna oletusasetuksiin	44
Taulukko 4	Testiajo 2:n vertaaminen oletusasetuksiin.....	45
Taulukko 5	Magneettiventtiilien käynnön vaikutus	49

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyöni toimeksiantajaa Jetitek Oy:tä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta. Myös heiltä saamani tieto ja resurssit ovat olleet kulanarvoista opinnäytetyö tehdessäni.

Opinnäytetyöni ohjaajaa Petri Kuismaa kiitän ideasta työn tekemiseen.

Kiitos myös avopuolisolleni Hannalle henkisestä tuesta projektin aikana.

Rovaniemellä 15.5.2015

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

LTO	lämmöntalteenotto
Kriittinen piste	lämpötila, jonka yläpuolella nestettä ei voida enää painetta nostamalla nesteyttää
Alikriittinen	kylmäprosessissa ei ylitetä kriittistä pistettä
Ylikriittinen	korkeapainepuolen paine ja lämpötila ovat kriittisen pisteen yläpuolella
OPD	kylmäaineen suhteellinen otsonihaitallisuus
GWP	kylmäaineen kasvihuonehaitallisuus
EER	energy efficiency ratio, kylmäntuoton hyötysuhde
Kylmä COP	sama kuin EER
HCFC, CFC	hiiltä, fluoria, klooria ja vetyä sisältäviä kylmäaineita
Latenttilämpö	energiamäärä, joka vapautuu tai sitoutuu aineen olo- muodon muuttuessa
Log p, h-piirros	kylmätekniikassa yleisesti käytetty piirros, jonka avulla kylmäprosesseja voidaan havainnollistaa

1 JOHDANTO

Perinteisessä kaupan kylmäjärjestelmässä hukkalämpöä syntyy valtavia määriä ja sitä on pyritty hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Suurin osa lämmöstä on kuitenkin lauhdutettu ulkoilmaan ja siten sitä ei ole pystytty hyödyntämään. Jetitek Oy on kehittänyt myymäläkäyttöön uudenlaisen lämmöntalteenottojärjestelmän, joka ei tarvitse rinnalle mitään muuta lämmitysjärjestelmää. Järjestelmä pystyy hyödyntämään porakaivoja sekä kylmäkoneen lauhduttamiseen että rakennuksen lämmitykseen samalla koneikolla. Kylmäaineena tässä laitteistossa toimii ainoastaan ympäristöystävällinen ja myrkytön hiilidioksidi.

Tämän opinnäytetyön tilaajana on Jetitek Oy. Jetitek Oy on kylmätekniikkaan erikoistunut yritys ja opinnäytetyössä tutkittava laitteiston LTO on yrityksen suunnittelema.

Työssä perehdytään hiilidioksidiin kylmäaineena ja esitellään kaupan kylmätekniikassa olevia hiilidioksidi- ja LTO-sovelluksia. Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella tutkittavan kylmälaitteiston kylmäkoneen tuottaman hukkalämmön hyötykäyttöä ja sen optimointia. Tarkoitus on löytää kyseisen tekniikan kehityskohteet ja miettiä ratkaisuja näihin ongelmiin.

Porakaivojen lataamisesta on Suomessa positiivisia kokemuksia energiataloudellisesti, mutta tarkempaa tutkimustietoa on hyvin vähän tai ei ollenkaan. Tässä tutkimuksessa onkin saatu faktatietoa kaivojen hyödyistä hiilidioksidikylmälaitoksen yhteydessä talviolosuhteissa. Kaivot toimivat lämpiminä aikoina hyvänä lämpönieluna ja kylmänä aikana lisälämmönlähteenä.

Suurin ero tämän myymälän lämmitysjärjestelmässä muihin on se, että kaikki kiinteistössä tarvittava lämpö saadaan kylmäkoneen lauhdepuolelta. Mitään muuta lämmönlähdettä ei siis tarvita. Laitteisto on hankintahinnaltaan hieman kalliimpi kuin perinteiset kylmälaitokset. Kuitenkin myymälää rakennettaessa erillisestä lämmitysmuodosta aiheutuvat kulut jäävät pois.

Talven 2015 aikana laitteistoa on testattu, tuloksia analysoitu ja koneikossa olevia ongelmia paikallistettu. Laitteistoon on asennettu lämpötila- ja virtausmittarit tarvittaviin kohtiin ja niiden perusteella on saatu faktatietoa energian kulutuskohteista. Porakaivojen vaikutukseen liittyen on tehty testiajoja, joissa laitteisto asetetaan toimimaan ilman porakaivoja. Näitä testiajoja verrataan tilanteeseen, jossa kaivot ovat käytössä. Mittausdata on kerätty talven 2014–15 aikana.

Lähteinä opinnäytetyössä on käytetty kylmätekniikkaan liittyvää kirjallisuutta sekä muita opinnäytetöitä ja diplomitöitä. Laitteistosta kerättyä dataa on myös käytetty aineistona. Datan pohjalta on tehty johtopäätöksiä ja pyritty puuttumaan ongelmakohtiin.

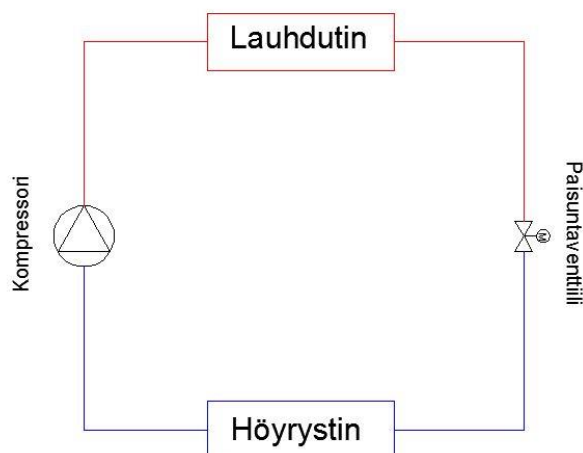
Hiilidioksidin käyttö kaupan kylmälaitteissa lisääntyy koko ajan ja tekniikka kehittyy nopeasti. Hiilidioksidin energiatehokkuuden lisäksi sen käyttö lisääntyy, koska epäorgaanisten kylmäaineiden käyttöä rajoitetaan lakisääteisesti koko ajan lisää. Nopea tekniikan kehitys johtaa tiedon nopeaan vanhenemiseen, joten tässä työssä on pyritty käyttämään mahdollisimman tuoreita lähteitä.

2 KYLMÄPROSESSI JA HIILIDIOKSIDI

2.1 Kylmäprosessi

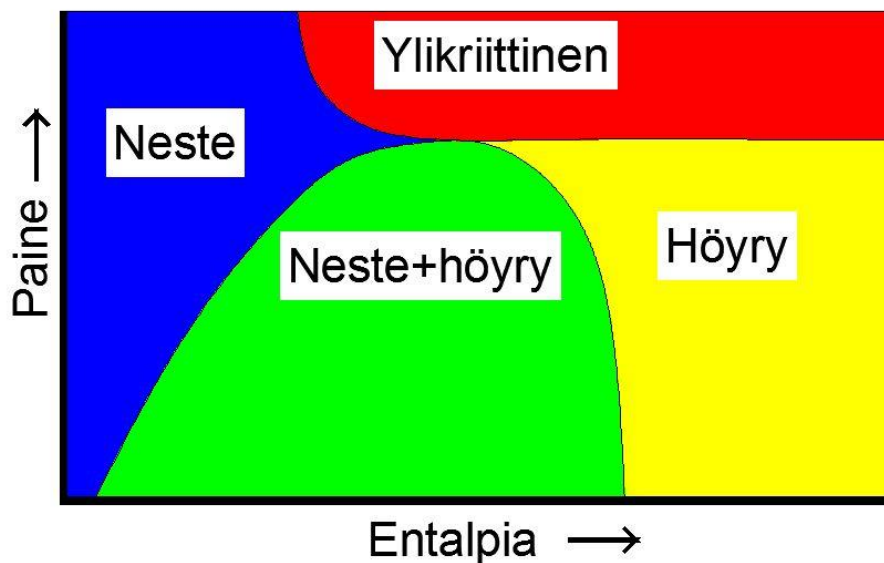
Kylmäprosessissa komponentit ovat samat kuin lämpöpumpussa. Kylmäprosessin tarkoitus on siirtää lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Tällaista siirtymistä ei luonnollisesti voi tapahtua, mutta kylmäaineen avulla se voidaan kuitenkin keinotekoisesti toteuttaa. Kylmäprosessi perustuu työaineena käytettävään kylmäaineeseen ja sen höyrystymiseen ja lauhtumiseen.

Kuviossa 1 on esitelty kylmäprosessin periaate yksinkertaistettuna. Höyrystimessä kylmäaine höyrystyy ja sitoo lämpöä ympäristöstään. Höyrystimen jälkeen kylmäainehöyry johdetaan kompressorille, joka nostaa kylmäaineen painetta. Kompressorissa kylmäainehöyryn lämpötila nousee huomattavasti. Kompressorin jälkeen kylmäainehöyry johdetaan lauhduttimeen, jossa kuuma kylmäainehöyry lauhtuu takaisin nesteeksi. Kylmäaineen lauhtuessa takaisin nesteeksi luovuttaa se ympäristöönsä lämpöenergiaa. Lauhduttimen jälkeen kylmäaineen paine lasketaan lähtötasolle paisuntaventtiilissä ja kierto lähtee alusta. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 17–18.)



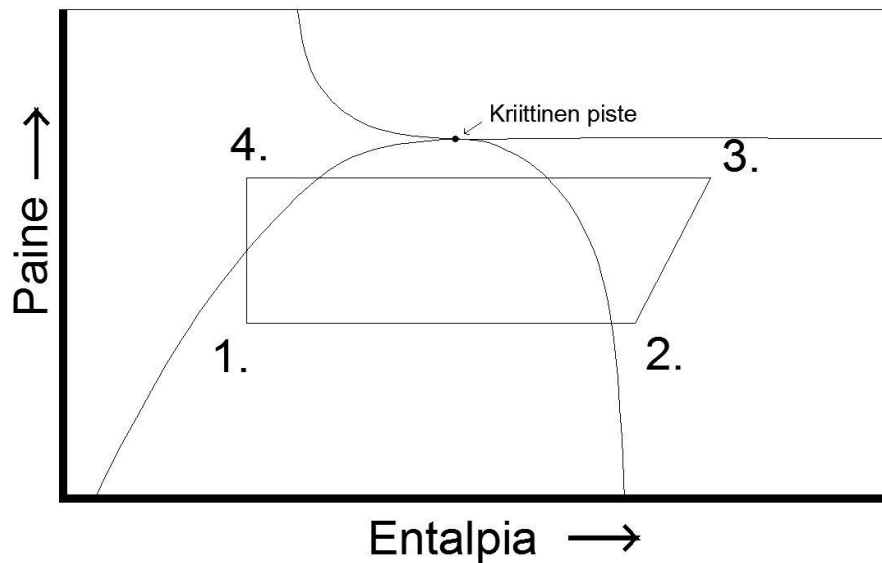
Kuvio 1. Lämpöpumppu

Käytännön kylmäteknikassa kiertoprosessi esitetään log p, h- tilapiirroksessa (kuvio 2). Piirroksessa vaaka-akselilla esitetään entalpian eli lämpösisällön arvot ja pystyakselilla on logaritminen paineen arvoasteikko. Piirroksessa rajakäyrä erottaa aineen eri olomuodot. Kriittinen piste löytyy rajakäyrän huippukohdasta. Käyrän vasemmalla puolella kylmäaine on nestettä, kun taas käyrän oikealla puolella kylmäaine on höyryä. Tasapainokäyrän sisään jäävällä alueella kylmäaine on höyryn ja nesteen seos. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 19.)



Kuvio 2. Log p, h -piirros

Kylmäprosessi esitetään log p, h- tilapiirroksessa kuvion 3 esittämällä tavalla. Piirroksesta nähdään kylmäaineen termodynaamiset ominaisuudet eri kylmäprosessin vaiheissa. Piirroksen avulla pystytään myös arvioimaan muun muassa höyrystimen ja lauhduttimen tehoja ja komprimoinnin vaatimaa tehoa. Kylmäaineen energiasisältö kasvaa mentäessä kuviossa oikealle ja paine kasvaa mentäessä ylöspäin. Lämpötilakäyrät kulkevat vaakatasossa neste+höyry- alueella. Liukuman omaavilla kylmäaineilla lämpötilakäyrät voivat kuitenkin nesteen+höyryn alueella laskea hieman. Höyryn alueella lämpötilakäyrät kaartuvat alaspäin. Nesteen alueella lämpötilakäyrät nousevat ylöspäin.



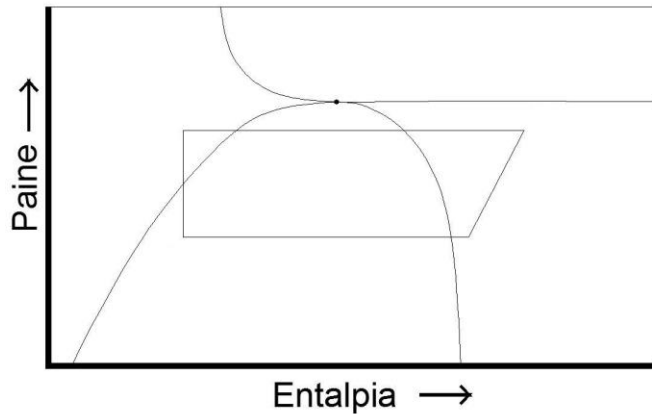
Kuvio 3. Kylmäprosessi log p, h -piirroksessa

Kuvion 3 kohdassa 1 kylmäaine johdetaan höyrystimeen ja siirtyessä kohdasta 1 kohtaan 2 kylmäaine höyrystyy. Kuviossa kohdasta 2 siirryttäessä kohtaan 3 kuvataan kompressorin tekemää työtä. Kompressorin tehdessä työtä kylmäaineen paine ja lämpötila nousee halutulle tasolle. Kylmäaineen entropia ei muutu optimaalisessa kompressorissa, joten komprimoinnin tapahtuessa prosessikaavio nousee entropiakäyriä pitkin. Kuitenkin todellisessa komprimoinnissa on jonkin verran häviöitä, ja käyrä hieman kaartuu oikealle riippuen kompressorin isentrooppisesta hyötysuhteesta. Kohdassa 3-4 kylmäaine lauhdutetaan takaisin nesteeksi ja samalla se luovuttaa ympäristöönsä lämpöenergiaa. Kohdassa 4-1 paine alennetaan halutulle tasolle paineenalennusventtiilissä ja kylmäaine johdetaan jälleen höyrystimeen. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 19.)

Kriittinen piste sijaitsee log p, h- tilapiirroksessa käyrän lakipisteessä. Aineen kriittinen piste tarkoittaa sitä, että kun paine ja lämpötila ovat tämän pisteen yläpuolella, ei ainetta pystytäkään enää lauhduttamaan takaisin nesteeksi jäähdyttämällä.

2.1.1 Alikriittinen prosessi

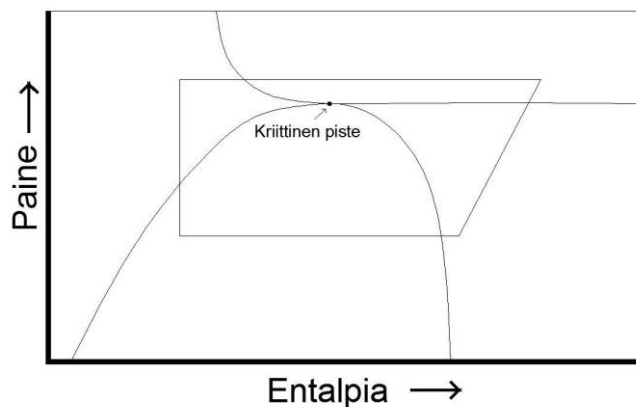
Alikriittinen kylmäprosessi tarkoittaa sitä, että kylmäaineen lämpötila ja paine eivät nouse yli kriittisen pisteen missään vaiheessa kiertoa. Kuviossa 4 on esitetty alikriittinen kierto prosessi log p, h - diagrammissa.



Kuvio 4. Alikriittinen kierto prosessi

2.1.2 Ylikriittinen prosessi

Kun kylmäaineen lämpötila ja paine nousevat ylikriittiseksi, sanotaan koko prosessin olevan ylikriittinen. Kuviossa 5 on esitetty ylikriittinen kierto prosessi. Ylikriittinen prosessi eroaa alikriittisestä siten että kylmäaine ei lauhdu lauhduttimessa takaisin nesteeksi. Ylikriittisessä prosessissa puhutaankin lauhduttimen sijaan kaasunjähdyttimestä.



Kuvio 5. Ylikriittinen kierto prosessi

Ylikriittisessä prosessissa kuumakaasu lauhtuu takaisin nesteeksi vasta paisuntaventtiilissä, kun paine lasketaan kriittisen pisteen alapuolelle. Jos lämpötila saadaan kuitenkin lauhdutettua alle kriittisen lämpötilan, kylmäaine muuttuu jälleen nesteeksi. Lauhdutusenergian tarve kasvaa huomattavasti mentäessä ylikriittiseen kylmäprosessiin. Ylikriittisen prosessin mahdollisuudet ovatkin koh-teissa, joissa tarvitaan sekä kylmää että lämmitystä.

2.2 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja, jotka toimivat välittäjäaineena lämpöpumpuissa ja kylmäkoneissa. Kylmäaineiden käyttö perustuu niiden ominaisuuksiin vastaanottaa lämpöenergiaa höyrystyessään ja vastaavasti luovuttaa lämpöenergiaa lauhtuessaan takaisin nesteeksi. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 30.)

Kylmäaineiden ympäristöystävällisyyttä kuvataan GWP (Global warming potential) ja ODP (Ozone depletion potential) arvoilla. Kylmäaineen GWP -arvo kertoo sen kasvihuonehaitallisuuden. Vertailulukuna käytetään hiilidioksidin arvoa, joka on 1,0. ODP -arvo kertoo kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden. Tämän arvon referenssilukuna käytetään R11 kylmäainetta, jonka ODP arvo on 1,0.

2.3 Hiilidioksidi kylmäaineena

Hiilidioksidia on käytetty kylmäaineena jo 1800-luvun puolivälistä asti. 1930-luvulla markkinoille tuli erilaisia halogeenihiilivetyjä (CFC ja HCFC), jotka syrjäyttivät hiilidioksidin kylmäaineena paremman tehokkuutensa ansiosta. 1990-luvun alussa epäorgaanisten kylmäaineiden ilmastovaikutuksista alettiin kuitenkin saada lisää tietoa ja niitä alettiin korvata jälleen orgaanisilla kylmäaineilla. Aluksi luovuttiin CFC-kylmäaineiden ja HCFC-kylmäaineden käytöstä. Niiden

tilalla alettiin käyttää HFC-kylmäaineita, jotka eivät sisällä otsonikerrosta hajottavaa klooria. (Manner 2013, 9.)

Hiilidioksidi on epäorgaaninen kylmäaine ja sen kylmäainekoodi on R744. Hiilidioksidin termodynaamiset ominaisuudet poikkeavat perinteisistä epäorgaanisista kylmäaineista huomattavasti. Taulukossa 1 on verrattu hiilidioksidin ominaisuuksia perinteiseen kaupan kylmäaineeseen R404a:han. Suurimmat erot aineominaisuuksissa hiilidioksidin ja muiden käytössä olevien kylmäaineiden välillä ovat matala kriittinen lämpötila ja korkea kriittinen paine.

Taulukko 1. Hiilidioksidin ominaisuuksia

	R744	R404a
Moolimassa [g/mol]	44,0	97,6
Kiehumispiste [°C]	-78,4	-46,6
Kriittinen lämpötila [°C]	31,1	72,1
Kriittinen paine [Bar]	72,1	37,3
Otsonihaitallisuus, OPD	0	0
Kasviohuonevaikutus, GWP	1	3920
Liukuma	ei liukumaa	0,8...0,2 °C

Hiilidioksidi yleistyy kaupan kylmälaitteissa koska vanhat HCFC- ja CFC-kylmäaineet ovat kiellettyjä uusissa kylmälaitoksissa. Suurin syy tähän on niiden GWP-arvo, joka on kaikilla niillä yli tuhatkertainen hiilidioksidiin verrattuna. Hiilidioksidin käyttöä kaupan kylmässä puoltaa myös sen lämmöntalteenottomahdollisuudet.

Hiilidioksidin tiheys on moninkertainen muihin käytössä oleviin kylmäaineisiin verrattuna. Kylmäaineen tiheyden (kg/m^3) ja latenttilämmön (kJ/kg) tulo on kyseisen kylmäaineen kylmäntuotto (kJ/m^3). Kylmäaineen kylmäntuotto kertoo kylmäaineen jäähdytyskapasiteetin tilavuutta kohden. Hiilidioksidin suuri kyl-

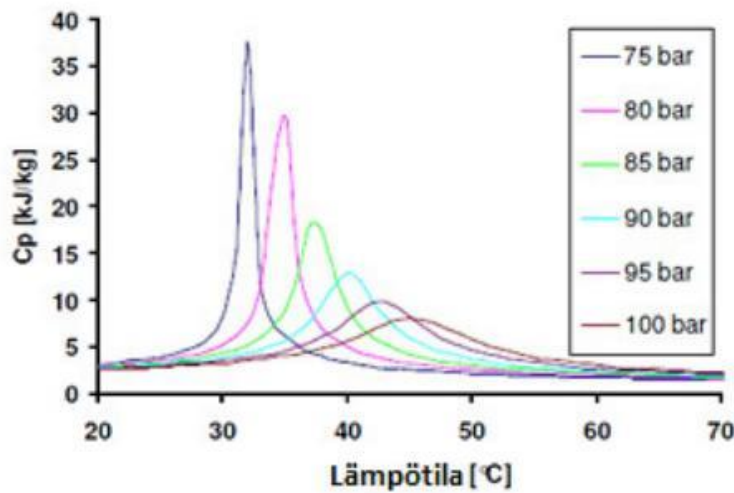
mäntuotto mahdollistaa pienten komponenttien käytön laitteistoissa. (Manner 2013, 14.)

2.3.1 Hiilidioksidikylmäkoneen toiminta ylikriittisenä

Hiilidioksidin kriittinen piste on $+31,1\text{ C}^\circ$ ja 72,1 baria. Kriittisen pisteen lämpötila on huomattavasti matalampi kuin useimmilla kylmäaineilla, joka johtaa siihen että hiilidioksidikylmäkoneen prosessi toimii monissa tapauksissa ylikriittisenä. Ylikriittinen hiilidioksidikylmälaitos suunnitellaankin useasti niin, että se voi toimia suurimman osan ajasta alikriittisenä, mutta tarvittaessa myös ylikriittisenä.

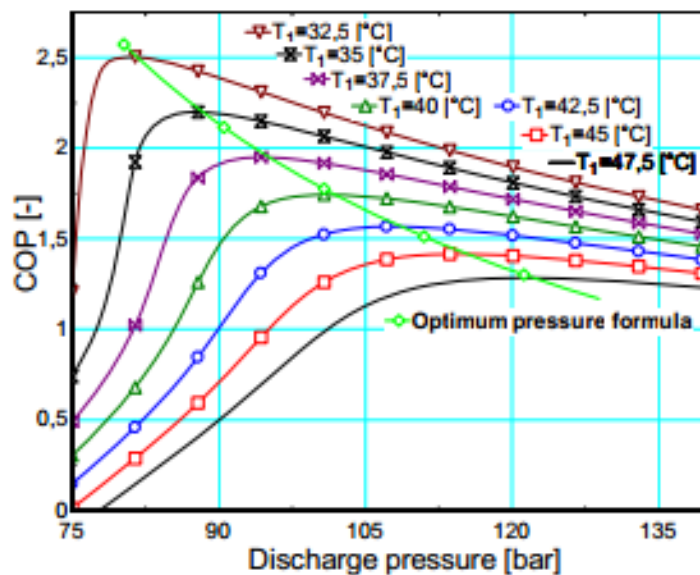
Kun kylmäaine on ylikriittisessä tilassa, sitä ei voi nesteyttää lauhduttamalla. Tämä täytyy ottaa huomioon kylmälaitoksen komponentteja suunniteltaessa. Hiilidioksidin termodynaamiset ominaisuudet muuttuvat huomattavasti kriittisen pisteen läheisyydessä ja tämä on otettava erityisesti huomioon suunniteltaessa ylikriittistä kylmälaitteistoa. Lauhdutustehoa joudutaan lisäämään huomattavasti mentäessä ylikriittiselle puolelle. Lauhdutustehon suurta kasvua voidaan myös hyödyntää lämmöntuotantotarkoituksessa. Myös komponenttien kestävyysvaatimukset kasvavat huomattavasti suuremman paineen takia ylikriittisessä laitoksessa. (Manner 2013, 12.)

Hiilidioksidin termodynaamisiin ominaisuuksiin kuuluu ominaislämpökapasiteetin suuret muutokset kriittisen pisteen läheisyydessä. Kuviossa 6 on esitetty hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona eri painetasoilla. Näistä termodynaamisista ominaisuuksien muutoksista johtuu hiilidioksidin lämpötilakäyrien erilainen kaartuminen $\log p$, h diagrammissa muihin kylmäaineisiin verrattuna. (Manner 2013, 18.)



Kuvio 6. Hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti (Manner 2013, 18)

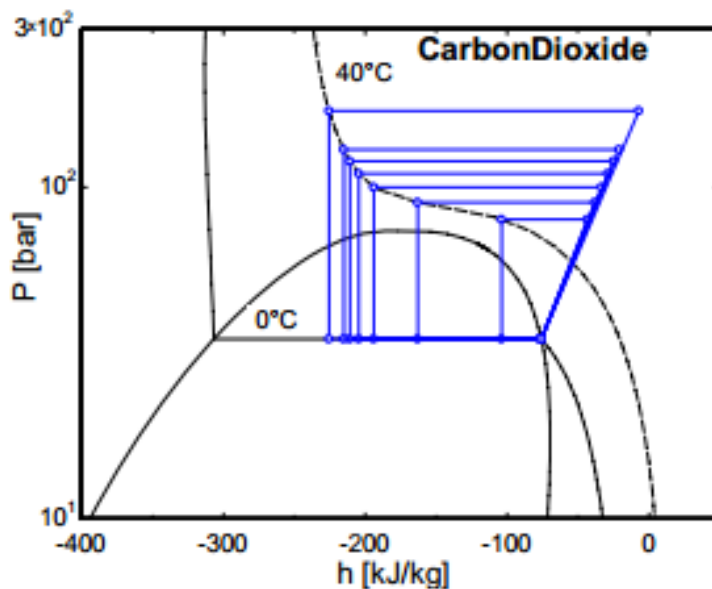
Ylikriittisenä hiilidioksidilaitoksen tehokkuus riippuu paljon lämpötilasta, joka saavutetaan kaasun jäähtyessä. Mitä alemmas kuumakaasun lämpötila saadaan jäähdytettyä, sitä parempi on kylmäkoneen EER luku. Log p, h- Kuvaajas-
sa tämä näkyy prosessia kuvaavan kierron leventymisenä. Kuviossa 7 on esitet-
ty optimaalisen paineen kaava eri kaasunjäähdyttimen ulostulolämpötiloille.
(Sawalha 2008, 49.)



Kuvio 7. Hiilidioksidikylmäkoneen COP lauhtumispaineen funktiona (Sawalha 2008, 50)

2.3.2 Optimaalinen käyntipaine ylikriittisenä

Ylikriittisenä toimiessaan hiilidioksidikylmäkoneelle on olemassa optimaalinen käyntipaine jolla saavutetaan paras kylmäkerroin. Paine riippuu lämpötilatasosta, joka saavutetaan kuumakaasun jäähtytyksessä. Kuviossa 5 on esitetty ylikriittisen kylmäkoneen kiertokuvaaja eri painetasoilla. Kuviosta näkee, kuinka paineen korotus vaikuttaa kylmätehoon. Myös vapautuva energiamäärä kasvaa huomattavasti pienelläkin paineennostolla.



Kuvio 8. Käyntipaineen vaikutus höyrystimen tehoon hiilidioksidilla (Sawalha 2008, 49)

2.3.3 Hiilidioksidin haasteet kylmäainekäytössä

Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena ei ole kuitenkaan täysin ongelmaton. Hiilidioksidin haittapuolia kylmäaineena ovat korkeat käyttöpaineet ja matala kriittinen piste, jotka tuovat omat haasteensa laitteiston mitoituksessa sekä korkeapainelaitedirektiivien täyttämiseksi. Koska ylikriittisessä hiilidioksidilaitoksessa paine voi nousta jopa 120 bar:in tasolle, asettaa se omat vaatimuksensa komponenttien kestävyydelle. NykYTEKniikka mahdollistaa kuitenkin hiilidioksidin vaatiman korkean painetaso turvallisen käsittelyn ja hallitsemisen.

Matala kriittinen piste aiheuttaa kylmäkertoimen heikentymistä korkeilla lauhtumislämpötiloilla, koska kylmäprosessi muuttuu ylikriittiseksi. Ylikriittisessä kylmäprosessissa lauhdutustehoa joudutaan lisäämään huomattavasti. Suomessa hiilidioksidin korkea lauhdutuslämpö ei kuitenkaan ole niin suuri ongelma kuin maissa, joissa ilmasto on huomattavasti lämpimämpi. Nykyään suurta lauhdutustehoa pystytäänkin hyödyntämään rakennuksen lämmitykseen ja hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksia, kuten porakaivojen latausta tutkitaan jatkuvasti lisää. (Peltola 2013, 3-4.)

Hiilidioksidi ei pysty kilpailemaan epäorgaanisten kylmäaineiden kanssa pelkällä kylmäteholla. Kun hiilidioksidikylmälaitokseen yhdistetään järkevästi toteutettu LTO järjestelmä, on hiilidioksidilla toimiva kylmälaitos kuitenkin varsin kilpailukykyinen ratkaisu verrattuna perinteisiin kylmäkoneisiin. Etenkin kohteissa, joissa kylmäntuoton lisäksi tarvitaan myös lämpöä, on hiilidioksidikylmälaitos osoittautunut kokonaisenergiataloudeltaan tehokkaaksi ratkaisuksi.

2.3.4 Hiilidioksidin ympäristövaikutukset

Hiilidioksidi on kylmäaineena huomattavasti ympäristöystävällisempi kuin muut tällä hetkellä käytössä olevat kylmäaineet. Esimerkiksi kaupan kylmässä yleisesti käytetyn R404a:n GWP-arvo on 3920. Toisin sanoen R404a:n kasvihuonehaitallisuus on 3920-kertainen hiilidioksidiin verrattuna.

Ympäristöasioiden lisäksi hiilidioksidin hyviin ominaisuuksiin kuuluu myrkyttömyys, palamattomuus ja sillä ei myöskään ole minkäänlaista vaikutusta elintarvikkeisiin. Näidenkin asioiden takia hiilidioksidi sopii hyvin käytettäväksi kaupan kylmässä. Hiilidioksidi on myös helposti saatavissa ja se on edullista.

2.4 Lauhdelämpö

Kylmäprosessissa syntyy lauhdelämpöä suuria määriä riippuen kylmäntuotannon määrästä, erityisesti hiilidioksidia kylmäaineena käytettäessä. Kylmäteknikassa lauhdelämpö koostuu tulistuksen poistosta, lauhdelämmöstä ja alijäähdy-

tyksen lämmöstä. Lauhdelämmön lämpötilataso ja energiamäärä riippuu käytettävistä lauhtumislämpötiloista ja kylmäaineen ominaisuuksista. Ylikriittisessä kylmäprosessissa lauhtumisen sijasta puhutaan kuitenkin kuumakaasun jäähtymisestä. (Espo 2014, 17.)

Hiilidioksidilaitoksissa lauhdelämmön määrä on huomattava. Nykyään onkin kehitelty erilaisia lämmöntalteenottojärjestelmiä lauhdelämmön hyödyntämiseksi. Alikriittisen ja ylikriittisen laitoksen lauhdepuolen lämmönluovutus eroavat toisistaan. Alikriittisessä laitoksessa lämmönluovutus tapahtuu pääasiassa aineen lauhtuessa takaisin nesteeksi, kun taas ylikriittisessä laitoksessa lämmönluovutus muodostuu lähinnä kylmäaineen jäähtyessä. Tästä syystä LTO:n suunnittelu on haastavaa laitokseen, joka pystyy toimimaan kriittisen pisteen molemmilla puolilla. (Manner 2013, 15.)

3 KAUPAN KYLMÄ

3.1 Kauppojen energiankulutus

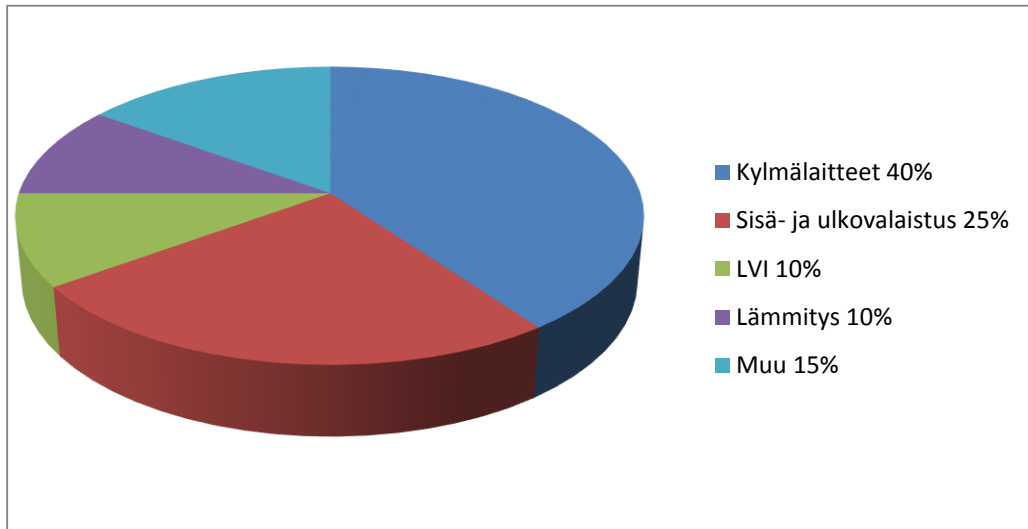
Suomessa päivittäistavaraa myyvien liikkeiden lukumäärä on 2000-luvulla pysynyt vajaassa 4000 myymälässä. Myymälät jaotellaan neljään eri luokkaan myyntipinta-alan mukaan. Suurimpia ovat hypermarketit, joiden myyntipinta-ala on yli 2500m². Toisena on markettiluokan myymälä, joiden myymäläpinta-ala on yli 400m². Lähikaupaksi määritellään 100-400m² myymäläpinta-alalla olevat myymälät. Pienimpiä ovat alle 100m² pienmyymälät ja kioskit.

Keskimääräiset sähkö- ja lämmönkulutukset vuositason myymälöissä vaihtelevat taulukon 2 mukaan. (Motiva 2012, 5.)

Taulukko 2. Myymälöiden energiankulutus (Motiva 2012, 5.)

Myymälä	Sähkönkulutus(kWh/brm ²)	Lämmönkulutus(kWh/brm ²)
Hypermarketti	220	80
Marketti	320–460	130–170
Lähikauppa	600	120

Tyypillisesti markettien sähkönkulutuksesta 40 % aiheutuu kylmäntuotannosta, 25 % valaistuksesta ja loput LVI-tekniikasta ja muista kulutuskohteista. Markettien kulutusta on havainnollistettu kuviossa 9.



Kuvio 9. Myymälän energiankulutuksen jakautuminen (Motiva 2012, 5)

3.2 Yleistä kaupan kylmästä

Kaupan kylmällä tarkoitetaan myymälöissä käytettyä kylmätekniikkaa. Kaupan kylmään luetaan kaikki myymälän kylmäkalusteet, kylmiöt ja kylmäkoneet. Tavallisessa ruokakupassa on kahden tasoista kylmää. Pakkaskalusteita tarvitaan pakastettaville tuotteille ja kylmäkalusteita viileässä pidettävillä tuotteilla. Kaupan kylmässä puhutaankin plussa- ja pakkaskalusteista. Pakkaskalusteiden lämpötilan tulee olla alle $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kylmäkalusteiden lämpötila tulee olla alle $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jos kylmäkalusteessa säilytetään jauhelihaa tai muita lihatuotteita tulee lämpötilan olla kuitenkin alle $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuotteiden säilyvyys varmistetaan tavallisesti säätämällä kylmäkalusteiden lämpötila hieman näiden arvojen alapuolelle. (Elin-
tarviketurvallisuusvirasto Evira 2013.)

Kauppojen kylmälaitteet perustuvat nykypäivänä keskitettyihin kylmäntuotantoyksiköihin. Myymälässä on yksi konepaketti, joka vastaa korkea- ja matalalämpötilakalusteiden kylmäntuotannosta. Suuremmissa yksiköissä käytetään pääsääntöisesti välillistä lauhdutusta ja pienemmissä vastaavasti suoralauhdutusta. Kylmäaineena nykyään käytetään pääsääntöisesti R404a-nimistä kylmäainetta. Viimevuosina Suomeen on kuitenkin tekniikan kehittyessä rakennettu myös hiilidioksidilla toimivia kylmälaitoksia. Hiilidioksidin käyttö lisääntyy kaupan kyl-

mässä sen ympäristöystävällisyyden ja uuden tekniikan ansiosta. (Motiva 2012, 5.)

Kylmäkalusteiden kansilla ja ovilla on suuri vaikutus kylmäkoneiden kuluttamaan energiaan. Pakkaskalusteiden kansituksilla on saatu koneikkojen pakkas-tehoja pienemmäksi. Myös plussakalusteiden kansituksia tullaan lisäämään tulevaisuudessa pienempien plussatehojen saavuttamiseksi. Pienempien kylmätehojen ansiosta kauppojen energiankulutusta pyritään pienentämään. (Motiva 2012, 6.)

Myymälöiden kylmäntarve riippuu monesta tekijästä. Kylmäntarvetta huomioidessa tulee ottaa huomioon kylmä- ja pakkaskalusteiden tyyppi, kylmää tarvitsevien tavaroiden määrä, niiden hengityslämmöt, kylmäkalusteiden lämpöhäviöt, muut lämpökuormat ja sääolosuhteet. Myös tavaroiden vaihtuvuudella on vaikutus kylmäntarpeeseen.

3.3 Hiilidioksidi kaupan kylmässä

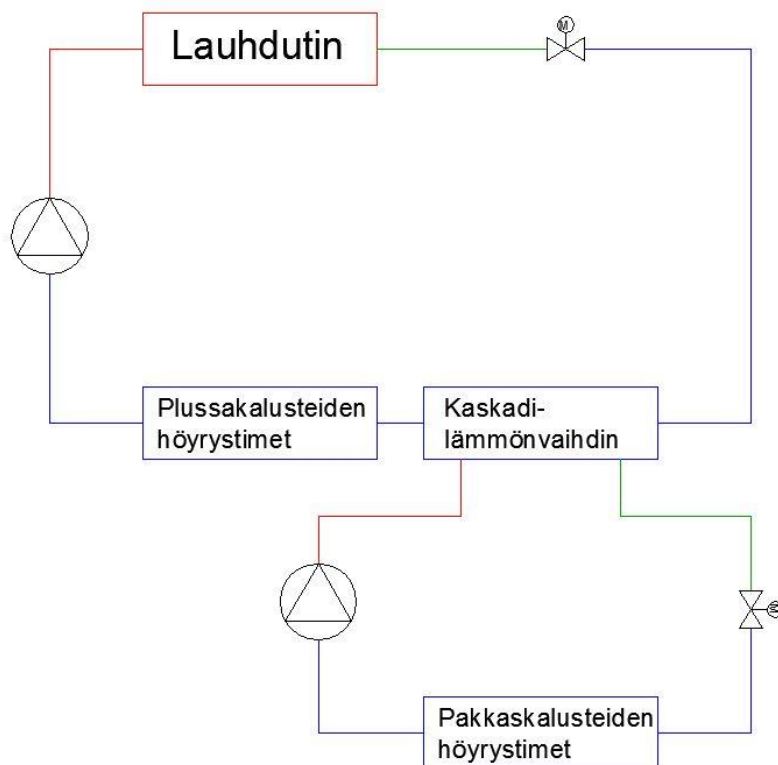
Hiilidioksidin käytön lisääntyminen oli nähtävissä jo kymmenen vuotta sitten, kuten se oli tehnyt jo Ruotsissa ja monissa Keski-Euroopan maissa. Suurin syy hiilidioksidin lisääntymiseen kaupan kylmässä on sen ympäristöystävällisyys ja sen avulla saavutetun energiansäästöt.

Huomioitava asia on myös se, että hiilidioksidi on epäorgaaninen kylmäaine. Epäorgaanisella kylmäaineella toteutetussa järjestelmässä voidaan käyttää suorahöyrysteisiä höyrystimiä kaikissa tapauksissa. Epäorgaanisia kylmäaineita käytettäessä voidaan joutua käyttämään välillistä höyrystystä turvallisuussyistä.

Hiilidioksidia voidaan käyttää kaupan kylmässä monella eri tavalla. Seuraavaksi esitellään muutamia yleisesti käytössä olevia hiilidioksidia kylmäaineena hyödyntäviä kytkentöjä.

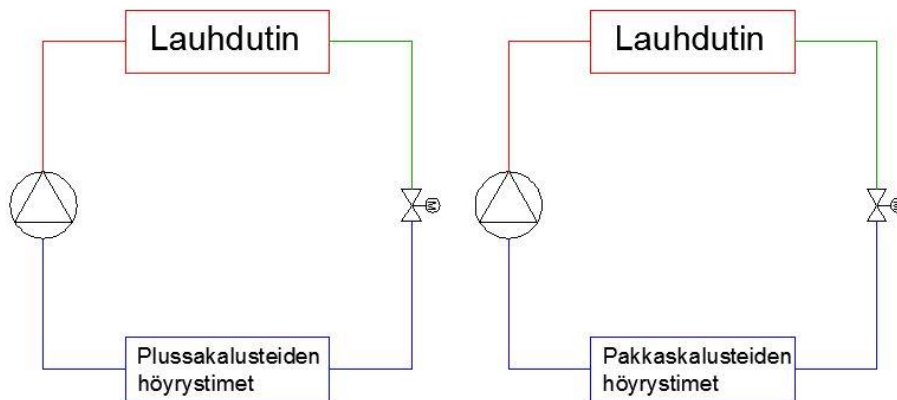
Kaupan kylmässä käytetään yleisesti niin sanottua kaskadikytettä. Kaskadikytessä matalalämpötilapiirin lauhdutin on samalla korkealämpötilapiirin höyrystin. Tätä lämmönvaihdinta kutsutaan myös kaskadilämmönvaihtimeksi. Tyypillisesti kaskadikytessä käytetään matalalämpötilapiirissä kylmäainetta hiilidioksidia ja korkealämpötilapiirissä ammoniakia. Myös muut kylmäainehdistelmät ovat mahdollisia.

Kuviossa 11 on kaksipuolaisen kaskadikytellä toteutetun kylmäjärjestelmän periaatekuva. Tällaisella kytkennällä voidaan toteuttaa esimerkiksi kaupan kylmän vaatima kaksitasoinen kylmäntuotanto.



Kuvio 11. Kaskadikytettä

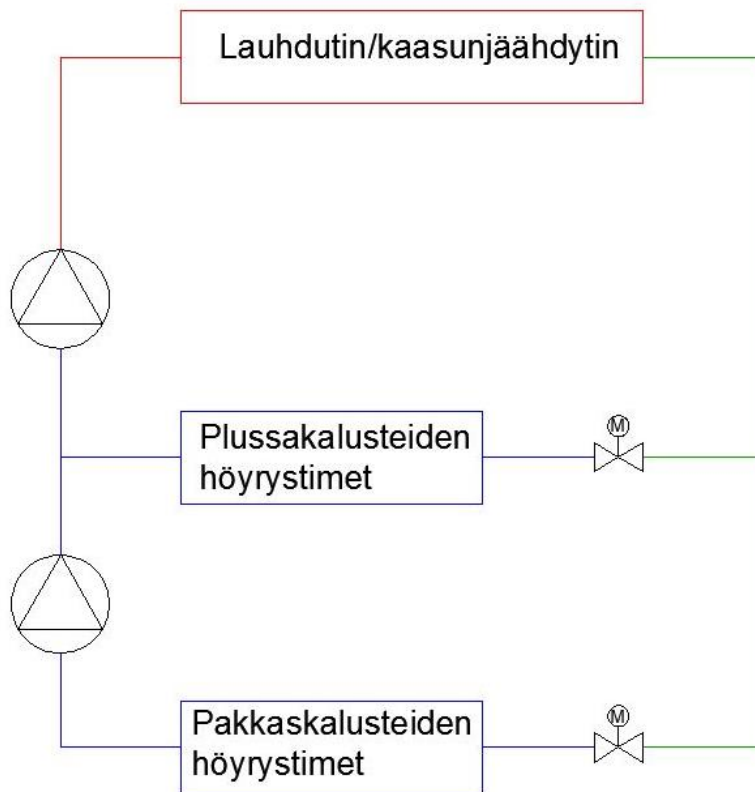
Kaupan kylmän kaksi lämpötilatasoa voidaan rakentaa siten, että pakkas- ja plussakalusteiden kylmäjärjestelmät on toteutettu erillisillä koneilla. Erilliskoneistoissa höyrystin ja/tai lauhdutin on toteutettu joko suorasti tai välillisesti. Kuviossa 10 esitetään kaksoiskytkennällä toteutettu kaksiportainen kylmäjärjestelmä. Hiilidioksidia voidaan käyttää matalalämpötilapiirissä kylmäaineena.



Kuvio 10. Erilliskoneisto

Booster-kytkennässä sama kylmäaine toimii välittäjäaineena pakkas- sekä kylmätasoilla. Kylmäainesäiliöltä lähtevän välittäjäaineen paine säädetään siten että saadaan kaksi eri painetasoa, matala- ja korkealämpötilatasot. Booster-kytkennässä voidaan käyttää hiilidioksidia kummallakin kylmän tasolla. Kuviossa 12 on esitetty booster-kytkennällä toteutetun kaupan kylmäjärjestelmän periaatekaavio.

Matalalämpötilatason kompressorit nostavat pakkaskalusteissa höyrystyneen kylmäaineen korkeapaineen tasolle. Korkeapaineekompressori nostaa sekä pakkaskalusteilta että plussakalusteilta tulevan kylmäainehöyryn paineen ja lämpötilan halutulle tasolle. Kompressoreiden jälkeen kylmäaine jäähtyy tai lauhtuu riippuen onko kyseessä yli-, vai alikriittinen kierto. Booster-kytkennällä toteutettua hiilidioksidilaitosta voidaan käyttää sekä alikriittisenä että ylikriittisenä.



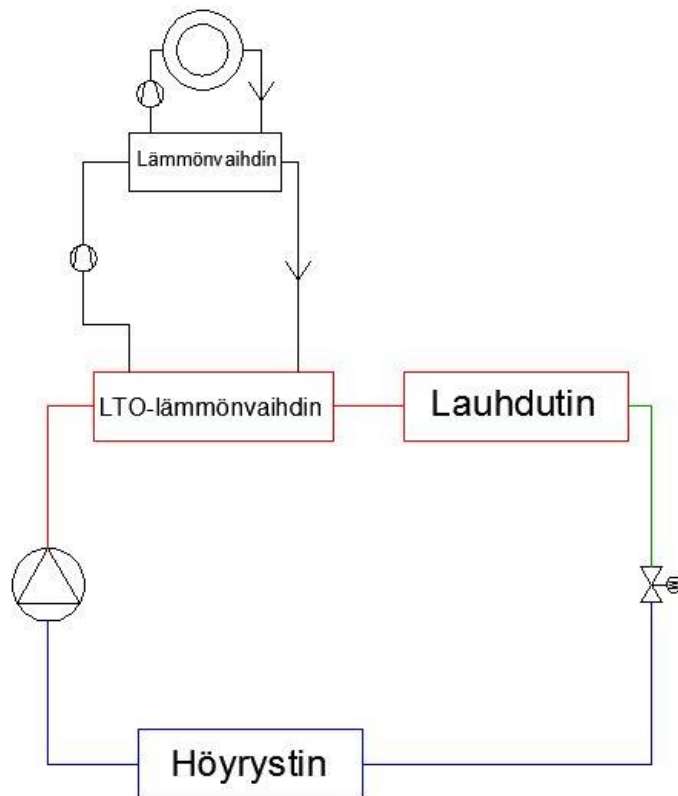
Kuvio 12. Booster-kytkentä

3.4 Lämmöntalteenotto kaupan kylmässä

Myymälöiden kylmäntuotannossa syntyy suhteellisen paljon lauhdelämpöä. Lauhdelämpöä pystytään hyödyntämään erilaisten lämmönvaihtimien kautta muun muassa myymäläkiinteistön lämmitykseen, IV-koneessa tuloilman lämmitykseen, käyttöveden lämmitykseen tai parkkialueen sulatukseen.

LTO:ssa täytyy ottaa huomioon kylmäprosessissa määritelty lauhtumislämpötila ja paine. Lauhtumislämpötila vaikuttaa LTO:ssa saatuun lämpötilatasoon. Paine täytyy ottaa huomioon erityisesti korkeapaineisten hiilidioksidilla toimivien kylmälaitosten LTO:n lämmönsiirtimiä suunniteltaessa. Myös hiilidioksidin termodynaamisten ominaisuuksien rajut muutokset kriittisen pisteen läheisyydessä tulee ottaa huomioon LTO:n suunnittelussa.

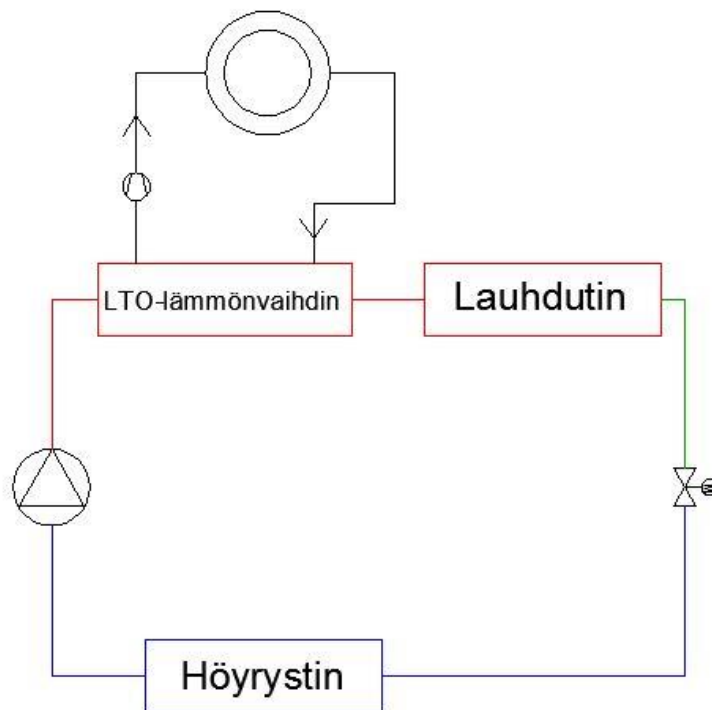
Lämmöntalteenotto voidaan järjestää monella eri tavalla. Välillisessä lämmentalteenottoratkaisussa kylmäkoneen lauhdepuolelle on asennettu lämmönvaihdin, josta otetaan lämpöä erilliseen kiertoon välittäjäaineen avulla. Välittäjäaineesta se taas edelleen hyödynnetään käyttökohteessa ja ylimääräinen lämpö lauhdutetaan esimerkiksi ilmajäähdytteisesti ulkoilmaan. Välillisellä lauhdutuksella pyritään estämään kylmäaineen ja käyttökohteen nesteen sekoittuminen etenkin epäorgaanisia kylmäaineita käytettäessä. Kuviossa 13 on periaatteellinen kuva välillisestä LTO:sta.



Kuvio 13. Välillinen LTO

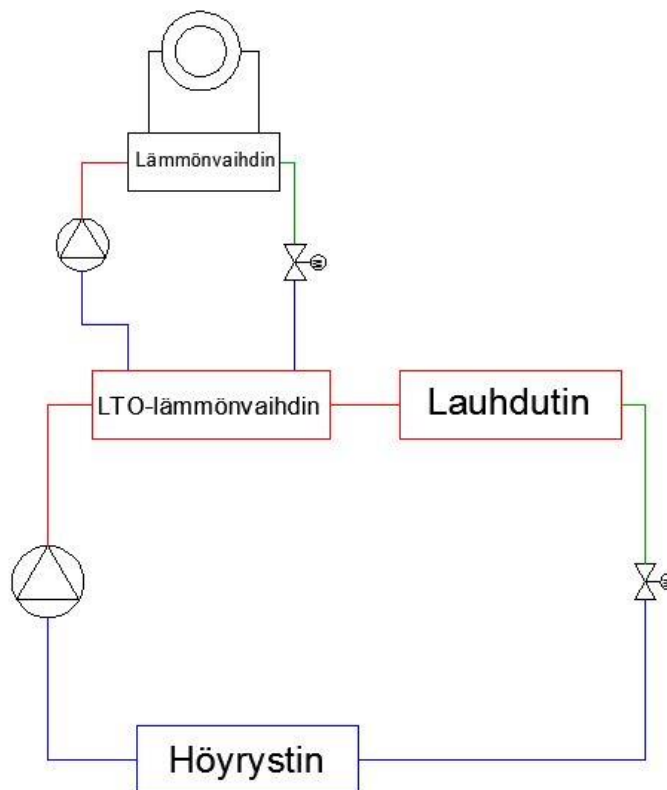
Suorassa LTO:ssa lauhdepuolelle kytketyllä lämmönvaihtimella lämmitetään suoraan lämmitettävää kohdetta, kuten lämmitysvesivaraajaa. Suorassa lämmentalteenotossa ei ole erillistä välittäjäainetta. Tällaisessa kytkennässä etuina

ovat pienet häviöt ja tehokas lämmönsiirto. Kuviossa 14 on periaatekuva suorasta LTO:sta.



Kuvio 14. Suora LTO

Kylmäkoneen lauhdepuolelle voidaan kytkeä myös lämpöpumpun höyrystin ja näin lauhdelämpö höyrystää toisen kylmäaineen. Esimerkki tällaisesta kytkennästä on kuviossa 15. Lämpö otetaan talteen erillisen lämpöpumpun lauhdepuolelta lämmönsiirtimellä joko välittäjäaineen välityksellä tai suorasti. Kytkentä muistuttaa kaskadikytkentää. Tällaisessa LTO:ssa kylmäkoneen matalalämpöinen lauhdelämpö voidaan hyödyntää korkeampia lämpötiloja tarvitsevilla kohteilla. Erillinen lämpöpumppu kuluttaa kuitenkin lisää sähköenergiaa.



Kuvio 15. Lämpöpumppu LTO

3.5 Lauhdelämmön tasot

Lämpöä voidaan ottaa talteen koko lauhtumis- tai jäähtymisosalta. Kuitenkin LTO:ssa voidaan ottaa huomioon onko kyseessä kaasunjäähtymistä, lauhtumisen lauhdelämpöä vai alijäähtytystä. Lauhdelämmön määrä riippuu hyvin paljon käytettävästä kylmäaineesta ja sen termodynaamisista ominaisuuksista. Log p, h piirroksista voidaan nähdä kuinka paljon ja minkä lämpöistä energiaa lauhdepuolella on käytettävissä.

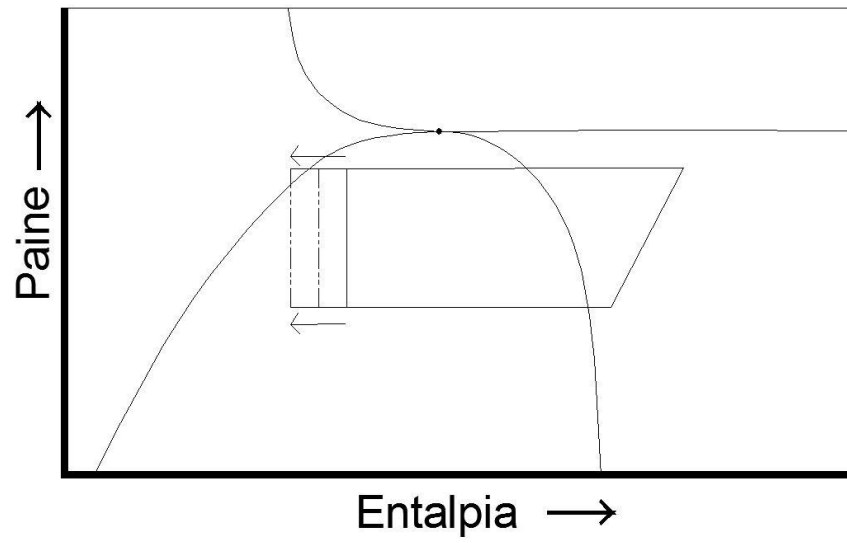
Kompressoreiden jälkeen kylmäaineen lämpötila on erittäin korkea. Lämpötila riippuu käytettävästä kylmäaineesta ja sen ominaisuuksista. Kaasunjäähdytyksellä tarkoitetaan perinteisesti sitä energiamäärää, joka lauhdepuolelta on saatavissa ennen kuin kylmäaine alkaa lauhtua takaisin nesteeksi. Kaasunjäähdytyksessä lämpötila on korkea, mutta saatavan energian määrä ei ole suuri.

Kaasunjäähdätyksen osuus on yleensä noin 10–20% koko lauhdepuolen energiasta. Kaasunjäähdätyksessä saatavaa energiaa onkin hyvä käyttää esimerkiksi käyttöveden lämmitykseen. Perinteisillä kylmäaineilla kaasunjäähdätyksen lämpötilataso on riittävä käyttöveden lämmitykseen. Ylikriittisessä kiertoprosessissa kaasunjäähdätyksen osuus on huomattavasti suurempi lauhdutuksen jäädessä kokonaan pois.

Lauhtumisen osuus on perinteisillä kylmäaineilla kokonaislauhde-energiasta noin 80–90% mutta sen lämpötilataso ei ole yleensä korkea. Epäorgaanisilla kylmäaineilla lauhtumislämpötila riippuu valitusta lauhtumispaineesta. Lauhtumisessa saatavaa lämpöenergiaa voidaan yleisesti käyttää lattialämmityksessä. Lauhtumisesta saatava energiamäärä on kuitenkin huomattavan suurin ja sen hyödyntäminen on kokonaisenergiataloutta ajatellen merkittävää.

Alijäähdätyksen osuus on vain noin 5 % kokonaislauhteesta, mutta alijäähdätystä lisäämällä voidaan parantaa kylmäkoneen EER-lukua. Alijäähdätyksessä hyödynnettävä lauhde-energia on matalalämpöistä ja sitä ei ole paljon, mutta kylmätehon lisäämisen vuoksi alijäähdätyks on kannattavaa.

Alijäähdätyksellä kylmäaineen lämpötilaa saadaan laskettua ja kylmäaineen entalpia pienenee. Kun kylmäaineen entalpia on pienempi höyrystimeen mennessä, pystyy se sitomaan enemmän lämpöenergiaa. Kuviossa 16 kylmäprosessia kuvaava kuvio levenee nuolten suuntaan alijäähdätystä lisättäessä. Kun kuvion leveyttä saadaan lisättyä muuttamatta kompressorin tekemää työtä, parantaa se koneen EER-lukua. (Espo 2014, 18.)



Kuvio 16. Alijäähdytyksen vaikutus kiertoon

4 TUTKITTAVAN JÄRJESTELMÄN ESITTELY JA SEN OSAT

4.1 Järjestelmän perustiedot

Tutkimuskohteena on myymäläkiinteistöön asennettu hiilidioksidia kylmäaineena käyttävä kylmälaitos. Laitos sijaitsee Rovaniemellä Rantavitikan Salessa. Kaupan lämmitettävä ala on 520 m² ja myymälän ala on 391 m². Kylmäainetäyttö järjestelmässä on noin 120 kiloa.

Myymälän kylmälaitos on toteutettu siten, että kaupan kylmä- ja pakkaskalusteista tuleva lauhde-energia pyritään hyödyntämään mahdollisimman hyvin porakaivojen ja suoran LTO:n avulla. Myymälä kiinteistössä ei ole muuta lämmönlähdettä kuin kylmäkoneikon lauhde-energia. Lämmitysvaraajassa on kuitenkin toimintahäiriön varalta sähkövastukset.

Myymälä on valmistunut vuonna 2013 ja koko kiinteistön lämmitystarve on pysytty kattamaan kylmäkoneikon lauhde-energialla. Lisälämmönvastuksia ei ole tarvinnut käyttää normaalioloissa. Kun kaupan kylmästä saatava lauhde-energia ei riitä myymälän lämmitykseen, alkaa koneikko jäähdyttää maapiirin nestettä lämmönvaihtimen kautta. Kylmäkoneikko toimii siten maalämpöpumppuna, eikä erillistä maalämpöjärjestelmää tarvita.

4.2 Kylmäkoneikko

Myymälän kylmäkoneikko on ruotsalaisen Green&Coolin valmistama. Järjestelmän kylmäteho on 40 kW ja pakkasteho 15 kW. Koneikko on toteutettu Booster-kytkennällä ja kylmäaineena toimii hiilidioksidi.

4.2.1 Kompressorit

Koneikossa on kolme plussapuolen kompressoria ja kaksi kompressoria pakkaupuolelle. Kompressorit ovat Dorinin valmistamia mäntäkompressoreita. Sekä plussa- että pakkaspuolella yksi kompressoreista on taajuusmuuntajaohjattu. Taajuusmuuntajaohjaus mahdollistaa kompressoreiden portaattoman säädön.

4.2.2 Lämmönvaihtimet

Järjestelmässä on viisi kappaletta lauhdepuolen lämmönvaihtimia ja yksi ”maalämpö” lämmönvaihdin. Kaikki lämmönvaihtimet ovat levylämmönvaihtimia. Kaikkien lämmönvaihtimien toisella puolella virtaa hiilidioksidi ja toisella puolen välittäjäaineena joko vesi tai vesi-etanoli-seos.

Kylmäntuotannossa muodostuva lämpöenergia johdetaan lämmönvaihtimien kautta joko porakaivoihin tai suoraan rakennuksen käyttö- tai lämmitysveden lämmitykseen. Yhden lämmönvaihtimen tehtävä on toimia lisälämmönlähteenä. Järjestelmässä on myös kaasunjäähdytin, mutta sen käyttö on vähäistä ja se onkin lähinnä varalta.

4.2.3 Rakennuksen lämmitys

Myymäläkiinteistössä on lattialämmitys miltei koko pinta-alalla. Lisäksi tuloilmaa lämmitetään IV-koneella. Myymälän tuulikaapissa ja lastauslaiturin ovella on tuulikaappipuhaltimet.

Rakennuksen lämmitysverkossa on 1500 litran puskurivaraaja, jota lämmitetään kylmäkoneen lauhde-energialla suorasti kahden lämmönvaihtimen avulla. Varaajassa on häiriötilanteiden varalta sähkövastukset. Kylmäkoneikon lauhde-energialla lämmitetään myös rakennuksen käyttövettä yhden lämmönvaihtimen kautta.

4.2.4 Porakaivot

Järjestelmään kuuluu neljä porakaivoa, kunkin syvyys on 200 metriä. Porakaivoissa kiertää 27 til- % etanoliliuos. Porakaivoja käytetään sekä kylmäaineen jäähdyttämiseen että lisälämmön tuotantoon. Porakaivoissa kiertävällä maaliuoksella pystytään myös kesällä viilentämään ja syksyllä kuivattamaan tuloilmaa IV-koneella.

Kesällä porakaivojen tehtävänä on toimia kaasunjäähdyttimenä ja ladata lauhde-energiaa maahan. Kun lauhde-energiaa ladataan maahan, maapiirin lämpötila nousee. Lauhde-energian lataamisesta maahan ei ole vielä suomessa kovinkaan paljon tutkimusmateriaalia. Tällä laitoksella tutkimusta on mahdollista tehdä.

Kokemuseräisesti on todettu että lauhteen lataamisella maahan on ollut positiivisia vaikutuksia kokonaisenergiatalouteen. Lämpöenergian säilymiseen maaperässä vaikuttavat kallioperän kivilajeista, sekä pohjaveden liikkeistä. Jos kallioperän kivilaji ja rakenne on sopiva ja pohjaveden liike on vähäistä, pystyy lämpöenergiaa varastoimaan maaperään kohtuullisen pitkiksi ajoiksi.

Porakaivojen käyttö kylmäkoneen lauhdutukseen on tehokasta myös siksi, että lauhdutusteho pysyy lähes samana ympäri vuoden. Suuren lauhdutustehon myötä kylmäaine saadaan lauhdutettua matalaan lämpötilaan myös lämpiminä aikoina.

4.3 Lisälämmön tuotanto

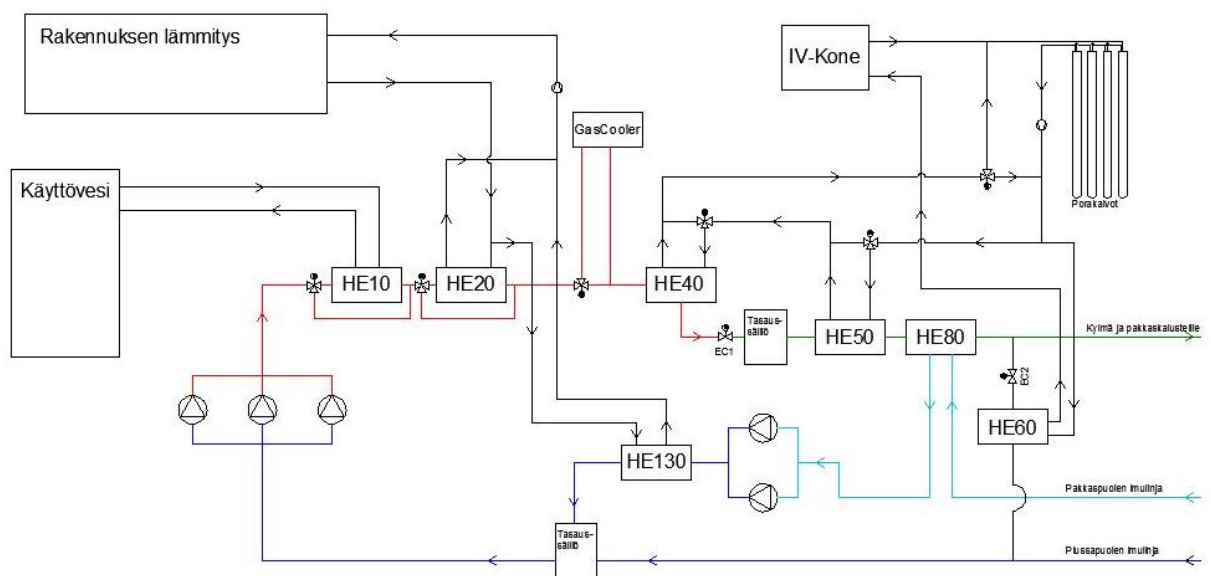
Talvella kylmänä aikana porakaivoja käytetään lisälämmöntuotantoon. Maapiiri on kytketty siten että maaliuosta voidaan jäähdyttää kylmäkoneikkoon liitetyn lämmönvaihtimen kautta. Porakaivot toimivat kylmäkuormana jäähdytyskoneikon plussapuolen kompressoreille.

Kun kylmäainetta höyrytetään maapiirin nesteen avulla, kylmäaineen massavirta kasvaa kylmäainekierrossa. Kasvava kylmäaineen massavirta tarkoittaa että lauhdutusteho kasvaa ja näin saadaan lisää lämpöenergiaa rakennuksen lämmitykseen. Lauhdepuolen tehoa voidaan lisätä myös nostamalla kompressorien ulostulopainetta.

4.4 Järjestelmän kytkennät

Testikohteen kylmälaitos on Booster-kytkennällä toteutettu. Kuviossa 17 on periaatekuva kylmäkoneesta ja siihen kytketystä LTO järjestelmästä. Booster-kytkennässä korkea- ja matalalämpötilapiirit on toteutettu samalla välittäjäaineella, tässä tapauksessa hiilidioksidilla. Koneikko on suunniteltu toimimaan sekä alikriittisenä että ylikriittisenä.

Ylikriittisenä koneikko joudutaan käyttämään vain kesän lämpimimpinä päivinä ja kun lämpöä tarvitaan lisää lauhdepuolella. Kuviossa 17 lämmönvaihtimet on kuvattu HE-lyhenteellä ja se tulee englannin kielen sanoista "heat exchanger." Ilmanvaihtokoneella käytetään myös rakennuksen lämmitykseen menevää lämpöä puskurivaraajan kautta. Järjestelmässä on myös käyttöveden esilämmitys lämmityksen puskurivaraajassa.



Kuvio 17. Tutkittavan järjestelmän periaatteellinen kytkentä

Booster-kytkennässä matalalämpötilatason kompressorit nostavat myymälän pakkaskalusteilta tulevan kylmäainehöyryn paineen ja lämpötilan vastaamaan plussakalusteilta tulevaan kylmäainehöyryn painetta ja lämpötilaa. Tämän jälkeen kylmäainehöyry imetään säiliöstä plussakompressoreiden imulinjaan, jonka jälkeen plussakompressorit nostavat paineen ja lämpötilan sopivaan jäähtymislämpötilaan. Korkealämpötilakompressoreiden jälkeen kuumakaasu alkaa jäähtyä laitteiston LTO:n lämmönvaihtimissa.

4.4.1 Lämmönvaihtimet HE10, HE20 ja HE130

LTO:n ensimmäinen lämmönvaihdin plussakompressoreiden jälkeen on HE10 ja siitä saadulla lauhde-energialla lämmitetään rakennuksen käyttövetä. Lämmönvaihtimen liuospuolella välittäjäaineena toimii vesi. HE10-lämmönvaihtimen jälkeen kuumakaasulinjassa on lämmönvaihdin HE20. HE20 lämmittää rakennuksen lämmitysvesivaraajaa HE130 kanssa. Kuvassa on esitettynä periaatteelliset kytkennät HE20 ja HE130 välillä. HE20 vastaa kuitenkin pääasiallisesti rakennuksen lämmöntuotannosta.

HE130-lämmönvaihtimen tehtävä on tasata pakkaspuolen komessoreilta tulevan kuumakaasun lämpötila sopivaksi plussakompressoreiden imulinjaan johdettavaksi. HE130-lämmönvaihtimelta saatu energiamäärä on kuitenkin hyvin pieni.

4.4.2 Lämmönvaihdin HE40

HE20-lämmönvaihtimen jälkeen kuumakaasu johdetaan HE40-lämmönvaihtimelle. HE40-vaihtimen tarkoitus on toimia kaasunjäähdyttimenä ja sillä lämmitetään porakaivoja. HE40-lämmönvaihtimen tarkoitus on jäähdyttää kuumakaasusta pois se energia, mitä ei ole pystytty hyödyntämään HE10- ja HE20-lämmönvaihtimissa. HE40:n osuus lauhdutuksesta on suuri etenkin lämpiminä vuodenaikoina kun lauhdutustehontarve on suuri ja lämmitystarve pieni.

4.4.3 Maapiiri ja lämmönvaihdin HE60

HE40, HE50 ja HE60 on kytketty siten että venttiilien ja automatiikan avulla maaliuosta voidaan johtaa lämpimänä aikana HE40 ja/tai HE50 kautta suoraan porakaivoihin, ja näin ladata lauhde-energiaa maahan. Maapiirin liuos ohjataan lisälämpöä tarvittaessa HE60:selle, jonka tehtävänä on höyrystää kylmäainetta ja näin lisätä kuormaa plussapuolen kompressoreille. Kuorman lisääntyessä myös lauhdepuolen energia lisääntyy ja saadaan tuotettua lisää lämpöä. Lisälämmönpyynnin tullessa HE40:lta tuleva lämmin maaliuos voidaan ohjata suoraan HE60-lämmönvaihtimelle tulevaan maaliuokseen. Kun lauhde-energialla saadaan HE60-lämmönvaihtimelle tulevan maaliuoksen lämpötilataso korkeammalle, paranee lämmönvaihtimen teho. Tämän kytkennän etuna on nopea lämmönsaanti HE60:sella ja se että kaikkea energiaa ei tarvitse kierrättää kaivojen kautta.

4.4.4 Lämmönvaihtimet HE50 ja HE80

HE50-lämmönvaihdin on alijäähdytysvaihdin. HE50:n tehtävä on porakaivojen avulla alijäähdyttää kylmäaine ennen kuin se johdetaan myymälän kylmä- ja pakkaskalusteille höyrystymään. Alijäähdytys parantaa laitteiston kylmätehoa ja etenkin lämpimänä vuodenaikana HE50:n merkitys korostuu. Lämpimänä vuodenaikana kylmätehoa tarvitaan enemmän. Log p, h- diagrammissa alijäähdytys näkyy siten että prosessin kiertoa kuvaava kuvio levenee vasemmalle päin. Kuvion leventyessä höyrystymisen teho kasvaa (kuvio 16).

HE80 on laitteiston sisäinen lämmönvaihdin ja se ei liity LTO:oon. HE80:n tarkoitus varmistaa, että pakkaspuolen kompressoreille ei pääse nestemäistä hiilidioksidia.

4.4.5 Paineenalennusventtiilit

Paineenalennusventtiili EC1:sellä korkeapaineisen kuumakaasun paine alennetaan myymälän kylmäkalusteiden vaatimalle tasolle. EC1 on green%cool'in

käyttämä merkintä ja todellisuudessa venttilin tyyppi on ICMTS-venttiili. EC1 venttiili alentaa paineen noin 60bar:in tasolle, jos paine on merkittävästi tätä suurempi kompressoreiden jälkeen. Paineenalennusventtiili EC2 tehtävä on alentaa HE60-lämmönvaihtimelle tulevan kylmäainehöyryn paine höyrystymistasolle. EC2 venttiilillä määritetään kylmäaineen virtaus HE60:sella lämmitystarpeen muuttuessa.

5 MITTAUKSET

5.1 Mittausten tavoite

Laitteiston toiminnan kehittämiseksi on tehty mittauksia ja tässä opinnäytetyössä mittaustuloksia on seurattu ja analysoitu. Mittauksilla oli tarkoitus saada to-
tuudenmukainen kokonaiskuva kylmäjärjestelmän toiminnasta ja sen kulutta-
masta energiasta.

Mittausten tarkoituksena oli myös kartoittaa rakennuksen lämmitykseen, käyttö-
veden lämmitykseen, porakaivojen lataamiseen ja porakaivoista otetun energi-
an määrää. Mittausten pohjalta on arvioitu ja suunniteltu tulevien laitosten eri
komponenttien kannattavuutta taloudellisesti, sekä energiateknisesti.

Mittausten perusteella pystyttiin myös puuttumaan järjestelmässä oleviin on-
gelmakoihtiin ja pyrittiin parantamaan niitä. Mittausten avulla pyrittiin optimoi-
maan myymäläkiinteistö toimimaan mahdollisimman pienellä energiankulutuk-
sella. Tämä opinnäytetyö on raportti talvella 2015 tehdyistä mittauksista ja mit-
taukset jatkuvat tulevaisuudessa.

5.2 Mittauskohdat

Laitokseen on asennettu jokaiseen lämmönvaihtimeen meno- ja paluuveden
lämpötila-anturit, sekä virtausmittarit. Mittausanturit on asennettu LTO puolelle.
Mittarit keräävät dataa jatkuvasti ja rekisteröivät sen tietojärjestelmään. Mittaus-
väliksi valittiin yksi minuutti. Näiden mittausten avulla nähdään tarkasti, minne ja
mikä verran energiakeskus on tuottanut energiaa. Antureiden tietoja on myös
mahdollisuus seurata live datana reaaliajassa tietokoneohjelmassa.

Kompressoreihin ja kaasunjäähdyttimen puhaltimiin on asennettuna tehon- ja
energianmittaus. Tämän mittauksen avulla nähdään tarkasti kylmäkoneikon
sähkönkulutus sekä tehon hetkelliset arvot.

5.3 Laskelmat

Antureilta saatava data on Excel-taulukkomuodossa. Lämpötilamittausten, sekä virtausmittausten perusteella pystytään laskemaan kunkin lämmönvaihtimen hetkellinen teho kaavalla.

$$P = V \times C \times \Delta T$$

missä

P	on	Teho [kW]
V	on	Virtaavan aineen massavirta [kg/s]
C	on	Aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kg*°C)]
ΔT	on	Lämpötilaero [°C].

Käytännössä helpoin tapa oli käyttää Excel-ohjelmaa, koska yhden päivän aikana tarvitaan 1440 kertaa laskea teho kyseisellä kaavalla jokaiselle lämmönvaihtimelle. Kun teho on laskettu tasaminuutin kohdalle, laskelmissa oletettiin että laitos toimii sillä teholla seuraavan minuutin ajan, jonka jälkeen lasketaan taas uusi hetkellinen teho. Hetkellisten tehojen perusteella lämmönvaihtimelle voidaan tehdä tehokäyrä ja laskea energiankulutus halutulle ajalle. Laskelmissa on otettu huomioon etanoliliuoksen ominaispaino sekä ominaislämpökapasiteetti porakaivoja lataavien ja maalämpölämmönvaihtimien osalta.

Syksyn 2014 aikana tein Excel-taulukot datan analysointia varten. Joulukuun 2014 aikana tehtiin harjoitustestiajoja, joilla pyrittiin varmistamaan varsinaisten testiajojen onnistuminen talven ja kevään 2015 aikana.

Samalla tavalla laskettiin myös kompressorien energiankulutus hetkellisen tehon perusteella. Kompressoreille on myös erillinen energiamittaus. Molemmilla mittaustavoilla saadaan samat arvot, joten mittauksia voi pitää luotettavina.

5.4 Testiajot

Talven 2015 testiajojen tarkoituksena oli testata porakaivojen vaikutus järjestelmän energiatalouteen ja optimoida kylmälaitos toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti kylmänä vuodenaikana. Tutkimuskohteessa tehtiin kaksi erilaista ajoa, joista toisen tavoitteena oli simuloida laitosta ilman porakaivoja ja toisen ajon tarkoitus oli käyttää porakaivoja mahdollisimman paljon lisälämmöntuotannossa. Tutkimuksen tarkoitus oli selvittää, onko lisälämpö HE20-lämmönvaihtimelle energiataloudellisesti kannattavampaa tehdä pelkästään painetta korottamalla, vai käyttää lisälämmöntuotantoon porakaivojen lämpöä.

Molemmista testiajoista tehtiin useampi testijakso ja testijaksojen pituudet vaihtelivat parista päivästä yli viikon kestäviin testijaksoihin. Koska kyseessä oli lisälämmöntuotantoon liittyvä testaus, testiajot oli ajoitettava kylmään vuodenaikaan. Testijaksoja pyrittiin suorittamaan mahdollisimman samanlaisissa ulkolämpötilaolosuhteissa, jotta ne olisivat vertailukelpoisia.

5.4.1 Testiajo 1

Tässä testiajossa kylmälaitosta ajettiin ilman porakaivojen lisälämpöä. Alkutalven testeissä porakaivoja käytettiin lämpönieluina, mutta lopputalven testiajot tehtiin ilman porakaivojen jäähdytyskapasiteettia. Testiajossa testataan kuinka paljon koneikko käyttää energiaa lämmöntuotantoon ilman maasta saatua lisälämpöä. Testiajojaksoja tehtiin useampia talven aikana, ja joka kerralla tulos oli samankaltainen.

Ennen testiajojen alkamista oletuksena oli että pelkällä paineenkorotuksella tehty lisälämpö vaatii kompressoreilta enemmän tehoa kuin massavirran lisääminen kompressoreilla. Kuitenkin jo ensimmäisestä testijaksosta kävi ilmi, ettei paineenkorotuksella pystytä tuottamaan lämpöä koko kiinteistön tarpeisiin. Sama ilmiö tuli ilmi jokaisella tehdyllä testijaksolla. Kun käytössä on hyvällä hyötysuhteella toimiva kylmäkone ja nykyaikaiset kansitetut kalusteet, on kylmäainevirta hyvin pientä plussakompressorien imulinjassa. Massavirta on niin pientä,

että käytössä olevilla kompressoreilla ei pystytä ylläpitämään korkeaa painetta ja lämmöntuotannosta tulee katkonaista. Kompressorin täytyy odottaa kylmäainehöyryn muodostumista ja kompressorin käynnistä tulee katkonaista. Tämä korostuu eritoten yöaikaan, kun myymälä on suljettuna ja kylmäkalusteiden ovia ei aukaista.

Liitteessä 2 on esitetty 20.–21.1.2015 tehdyn testiajon kuvaaja oleellisten lämmönvaihtimien osalta. Tämän testin aikana ovipuhaltimien magneettiventtiilit olivat vielä väärinpäin. Sillä ei kuitenkaan ole merkitystä, koska testissä tutkittiin koneikon lämmöntuotantoa. Lämmönjaon tehokkuudella ei siis ole merkitystä. Ulkolämpötila oli lähes koko vuorokauden ajan alle -20°C . Kuvaajasta näkyy kuinka myymälän lämpötila laskee alle $+15^{\circ}\text{C}$:een yöllä. Tässä vaiheessa kyseinen testijakso lopetettiin, koska puskurivaraajaan sähkövastukset lähtivät päälle.

Kun lämmitysverkoston lämpötila alkaa laskea, sen myötä myös HE20:lle tulevan veden lämpötila laskee. Liitteen testiajon aikana HE20:lle tulevan veden lämpötila laski huomattavasti. Lämpötilaeroa ei HE20:lla kuitenkaan saatu kuin noin 1°C . Näin ollen lämmitysverkoston lämpötila alkoi laskea. Koneikko ei pystynyt ylläpitämään lämmitysverkostossa tarpeeksi korkeaa lämpötilaa.

Kylmäkoneikko kulutti liitteessä 2 esitetyn vuorokauden aikana vain 199kWh energiaa, mikä on verrattain vähän. HE20-lämmönvaihtimella lämpöä tuotettiin 248 kWh. Vertailukohdaksi valitsin 21. – 22.3.2015 koneikkoa ajettiin oletusasetuksilla. Ulkolämpötila oli päivällä noin -5°C ja yöllä lämpötila laski lähes -20°C :een. Tällaisella ulkolämpötilalla HE20-lämmönvaihtimella tuotettiin 214 kWh lämpöenergiaa. Tällä lämpömäärällä myymälä pystyttiin pitämään lämpimänä.

Taulukossa 3 on vertailtu testiajoa 1 ja oletusasetuksia oleellisten lämmönvaihtimien osalta. Taulukossa olevat arvot ovat lämmönvaihtimien osalta lämpöenergiaa ja kompressorien osalta sähköenergian kulutusta. Arvot ovat vuorokautisen energian määriä.

Taulukko 3. Testiajo 1:n verrattuna oletusasetuksiin

Koneikon asetus	Testiajo 1	oletus
	20. – 21.1.2015	21. – 22.3.2015
HE10	48 kWh	55 kWh
HE20	248 kWh	214 kWh
HE40	60 kWh	294 kWh
HE60	0 kWh	85 kWh
Kompressorit	199 kWh	217 kWh
Vrk keskilämpötila	-19,8 C°	-10,5 C°
Sähkövastukset	Käytössä	Ei käytössä

Kompressoreiden pieni energiankulutus voisi selittyä myös sillä, että kun myymälän lämpötila alkoi laskea, kylmätehoa tarvittiin vähemmän. Kun kylmäntarve alkoi laskea, kylmäainevirta koneikossa pieneni entisestään. Kylmäntarpeen ja sitä kautta kylmäainevirran pientyminen yöaikaan näkyy liitteessä 2 selkeästi.

Pientyneestä kylmäainevirrasta saatiin vielä vähemmän lämpöä ja molemmat tapahtumat edistivät toisiaan. Liitteessä 2 näkyy, kuinka HE20:n teho laskee huomattavasti yöllä. Kun kylmäainevirta pieneni koko ajan, pieneni myös kompressorien ottama teho. Näin järjestelmä ei pysty toimimaan ja lämpötila lämmitysverkostossa laskee. Lämpötilan laskun seurauksena sähkövastukset lähtivät päälle.

5.4.2 Testiajo 2

Toisessa testiajossa tarvittava lisälämpö tuotettiin pelkästään HE60-lämmönvaihtimen kautta lisäämällä plussakompressoreiden massavirtaa. Painelle säädettiin yläraja, joten painetta ei tämän testiajon aikana nostettu lisälämmöntuotantotarkoituksessa. Ylimääräinen lämpöenergia lauhdepuolella jäähdytettiin HE40-lämmönvaihtimen kautta porakaivoihin, ja pyrittiin sitä kautta

nostamaan porakaivojen lämpötilatasoa. Tällä tavalla koneikko toimii myös oletusasetuksilla.

Testiajossa 2 oletettiin koneikon kuluttavan vähemmän energiaa verrattuna ensimmäiseen testiajoon. Testiajoja tehtiin testiajo 1:n tapaan läpi talven useampia ja testijaksoja pyrittiin saamaan mahdollisimman erilaisista sääoloista. Toisesta testiajosta ei saatu ajettua erittäin kylmää testijaksoa, jossa magneettiventtiilit olisivat olleet oikeinpäin. Osatekijä oli poikkeuksellisen lämmin maaliskuu. Testiajo 2:lla pystyttiin kuitenkin pitämään myymäläkiinteistössä lämpö yllä joka kerta. Sähkövastuksia ei tarvinnut käyttää testiajo 2:n aikana.

Taulukossa 4 on esitetty kolmen eri päivän energiamäärät vuorokauden ajalta oleellisten lämmönvaihtimien ja kompressorien osalta. Taulukossa kahden ensimmäisen vuorokauden aikana koneikossa on ollut testiajo 2:n asetukset päällä, kun oikeanpuolimaisen päivän aikana oletusasetukset. Sähkövastuksia ei ole käytetty missään vaiheessa toisen testiajon aikana.

Taulukko 4. Testiajon 2:n vertaaminen oletusasetuksiin

Koneikon asetus	Testiajo 2 11. -12.3	Testiajo 2 14. 15.3	Oletus
HE10	54 kWh	54 kWh	55 kWh
HE20	145 kWh	120 kWh	160 kWh
HE40	309 kWh	316 kWh	291 kWh
HE60	18 kWh	15 kWh	27 kWh
Kompressorit	185 kWh	180 kWh	187 kWh
Vrk keskilämpötila	-4,1 °C	-1,5 °C	-2,5 °C

Kuten taulukosta nähdään, HE40 energia on ollut pienempi oletusasetuksilla käydessä. Sama ilmiö toistui muissakin tehdyissä testiajoissa, joissa paineenkorotus oli rajattu pois käytöstä. Tämän johtuu hiilidioksidin termodynaamisista ominaisuuksista kriittisen pisteen läheisyydessä. Kun paine nostetaan yli kriitti-

sen pisteen, HE20:lla hyödynnettävissä oleva lämpö lisääntyy huomattavasti. Vastaavasti HE40-lämmönvaihtimen jäähdytystarve pienenee. Tätä ilmiötä on selitetty tämän opinnäytetyön luvussa 5.8.4. Lämmöntuotanto olisikin testien perusteella energiatehokkainta tehdä lisäämällä massavirtaa HE60 kautta energian lisäämiseksi, sekä korottaa paine ylikriittiselle alueelle. Paineen korottaminen on järkevää, koska sillä saadaan enemmän energiaa HE20-lämmönvaihtimelle, kun taas HE40-lämmönvaihtimen osuus kaasunjäähdytyksestä pienenee.

Testiajossa 2 huomattiin, että kompressorien huipputeho nousi noin 40 kW:iin huolimatta siitä, ettei paineen korotus ollut käytössä. Liitteessä 3 on esitetty yhden tunnin ajalta lisälämmöntuotantopiikki. Liitteestä nähdään kuinka kompressorit käyttävät saman huipputehon, vaikka paineenkorotus on toisessa rajoitettu.

5.4.3 Talven testiajoissa saatuja kulutuslukemia

Kun järjestelmästä saatiin korjattua siinä havaittuja ongelmia ja kylmäkoneikko toimi halutulla tavalla, oli talviolosuhteissa vuorokautinen kulutus kompressoreilla 170-220kWh/vrk. Nämä kulutuslukemat on saatu koneikon toimiessa oletusasetuksilla. Ulkolämpötila vaihteli välillä 0 °C - -20 °C. Kun arvioidaan koneikon keskiarvoiseksi kulutukseksi talvella 190kWh/vrk, tulee myymälän pinta-ala huomioon otettuna vuorokautiseksi kulutukseksi 0,37kWh/brm². Jos tämä luku kerrotaan 365 päivällä, saadaan vuosikulutus. Vuosikulutukseksi tulee noin 135 kWh/brm². Arvioidaan että koneikon sähkönkulutus hieman laskee kesän aikana, koska lämmitystarvetta ei ole ja porakaivojen ansiosta kylmäjärjestelmän kylmä-COP pystytään pitämään hyvänä kesälläkin. Todellinen kulutus on siis todennäköisesti pienempi.

Perinteisesti tämän luokan myymälässä kokonaisvuosikulutus on noin 600kWh/brm² (Motiva 2012, 5). Tästä luvusta kylmäjärjestelmien ja lämmityksen osuus on noin 50 %, eli 300kWh/ brm² (Motiva 2012, 5). Kun tätä verrataan tässä työssä saatuun kulutuslukemaan, on se yli kaksinkertainen.

5.5 Testiajoissa havaittuja ongelmia järjestelmässä

Testiajojen järjestelyt aloitettiin vuoden 2014 aikana, jolloin asennettiin anturit ja datan kerääminen alkoi. Anturien asennuksen jälkeen kaikkien anturien arvot tarkastettiin ja niiden todettiin vastaavan todellisuutta.

Alussa ongelmaksi muodostuivat datassa olevat jaksot joiden aikana mittaustulokset eivät tallentuneet järjestelmään. Tämä oli tietotekninen ongelma joka saatiin korjattua.

5.5.1 HE20-lämmönvaihtimen lämpötilaero

Tammikuun aikana tehtyjen testiajojen perusteella kävi ilmi että koneikko ei toiminut toivotulla tavalla. HE60-lämmönvaihtimen käyttö oli huomattavan suurta. Koneikko alkoi tuottaa lisälämpöä jo ulkolämpötilan ollessa noin 0C°. Kokemuksperäisesti koneikon lämpöenergian tulisi riittää paljon kylmemmissäkin lämpötiloissa. Testeissä paljastui HE20-lämmönvaihtimen nestepuolella lämpötilaeroksi vain noin yksi aste. Yhden asteen lämpötilaerolla virtauksen täytyy olla huomattavan suuri, jotta lämpöä saataisiin koko rakennuksen lämmitystarpeet täyttävä määrä.

Lämpötilaeron pitäisi muodostua puskurivaraajan lämpötilakerrostuman ansiosta. puskurivaraajassa ei kuitenkaan ollut toivottua lämpötilakerrostumaa. Myös lämmityskierrosta palaavan veden lämpötila oli mitoitusarvoa huomattavasti suurempi. Lämpötilakerrostuman olisi tarkoitus muodostaa lämpötilaeroa lämmönvaihtimella. Tarpeettoman suuren lämpötilan lämmityskierron paluuputkessa, sekä pienen lämpötilakerrostuman aiheuttajaksi mahdollisia vikakohteita olisi HE20-lämmönvaihtimen kytkentä varaajaan, varaajan rakenteen tai ovipuhaltimien tarpeeton läpivirtaus.

Kylmäkoneikko käyttikin HE60:tä lisälämmöntuotantoon jo ulkoilman ollessa nolla astetta. Hyvän lämpötilaeron tulisi olla HE20 nestepuolella lähes 10 astetta talviolosuhteissa.

Ongelmaa tarkasteltaessa selvisi että myymälän ovipuhaltimissa olevat magneettiventtiilit oli asennettu väärinpäin. Tällöin ne päästivät turhaan lämmintä vettä ovipuhaltimien läpi. Kun lämmintä vettä pääsi liiaksi lämmityskierron paluulinjaan, HE20-lämmönvaihtimelle tulevan veden lämpötila nousi. Kuumakaa-sun loppulämpötila HE20-lämmönvaihtimella kasvoi haluttua suuremmaksi ja pienempi osa kylmäkoneikon lauhde-energiasta saatiin hyödynnettyä.

Kun magneettiventtiilit käännettiin oikeinpäin, huomattiin heti positiivinen vaikutus. HE20-lämmönvaihtimelle menevän veden lämpötila laski useita asteita ja HE20-lämmönvaihtimella lämpötilaero kasvoi noin yhdestä asteesta vajaaseen viiteen asteeseen.

5.5.2 Lämpöenergian turha kierrättäminen

Testiajojen perusteella kylmäkoneikon kompressorit kulutti epätavallisen paljon sähköä ja asiaa alettiin tutkia Jetitek:in kanssa. Ongelma huomattiin 24. - 29.1.2015 tehdyissä testiajoissa, mutta se on ollut olemassa koko ajan. Liitteessä 1 on kuvattu koneikon toimintaa eri lämmönvaihtimien ja kompressorin tehon osalta kyseisen testiajon ensimmäisen vuorokauden aikana.

Liitteestä 1 nähdään, miten 24. –5.1.2015 koneikko on käyttänyt huomattavasti HE60-lämmönvaihdinta. Lämpöenergiaa on kuitenkin lauhdutettu huomattava määrä HE40:llä samaan aikaan. Jos lämpöenergia olisi saatu hyödynnettyä tehokkaammin HE20-lämmönvaihtimella, ei lämpöä olisi tarvinnut kierrättää LTO-puolelta suoraan HE60-lämmönvaihtimelle. Tämä lämpöenergian kierrättäminen aiheuttaa suurta ja tarpeetonta kuormaa kompressoreille.

Lämpötilaeroa saatiin lisättyä HE20-lämmönvaihtimelle kääntämällä ovipuhaltimien magneettiventtiilit oikeinpäin. Lämpöenergian turha kierrättäminen väheni

huomattavasti HE20 toimiessa tehokkaammin. Lämpötilaero ei kuitenkaan ollut vielä toivottua 10 °C. Taulukosta 5 voi nähdään, kuinka koneikon toiminta on muuttunut magneettiventtiilien kääntämisen jälkeen. Taulukossa on esitetty vuorokautiset energiat oleellisilla lämmönvaihtimilla ja kompressoreilla kulutettu sähköenergia.

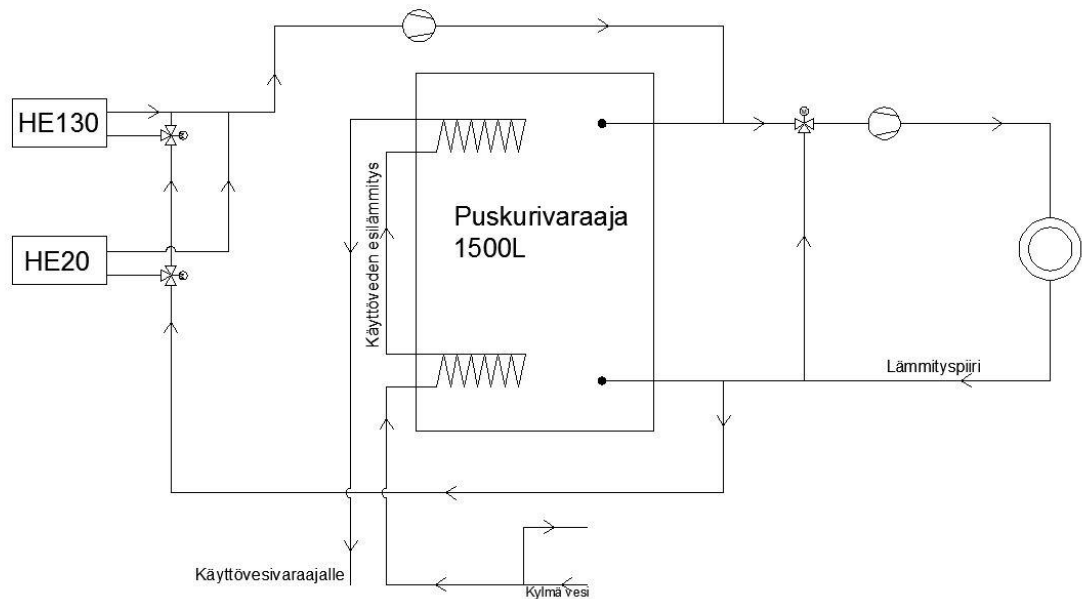
Taulukko 5. Magneettiventtiilien käännön vaikutus

	Vrk energia - magneettiventtiilit väärinpäin	Vrk energia - magneettiventtiilit oikein
HE10	48kWh	55kWh
HE20	193kWh	194kWh
HE40	340kWh	299kWh
HE60	110kWh	57kWh
Kompressorit	240kWh	204kWh
Vrk keskilämpötila	-8,5C°	-6,7C°

5.5.3 Puskurivaraajan lämpötila ei nouse

Seurannassa aikana huomattiin että varaajan ylälämpötila oli kevättalvella liian matala. Kun koneikolta saatava lauhdeteho vastaa myymälän kulutusta, menee kaikki lämpö suoraan lämmitysverkostoon. Kun kaikki lämpö menee suoraan lämmityskierto, puskurivaraajan lämpötila nouse lainkaan. Tämä huomattiin etenkin keväällä, kun vuorokauden lämpötila laski yöllä alle nollan ja päivällä lämpötila nousi muutaman asteen nollan yläpuolelle. Kun varaajan lämpötila ei nouse päivällä, siitä ei saada yöllä hyötyä. Lisälämpöä joudutaan käyttämäänkin paljon aikaisemmin verrattuna tilanteeseen, jossa varaajan lämpötilataso on korkeampi.

Puskurivaraaja ei lämpene, koska sitä olisi tarkoitus ladata HE20:ltä tulevilla vedellä. HE20 on kytketty lämmitysjärjestelmään kuviossa 18 kuvatulla tavalla. Kaiken lämmön mennessä suoraan lämmityskierto, varaaja ei lämpene.



Kuvio 18. Tämänhetkinen lämmönjako myymälässä

5.6 Parannusehdotukset

Talven testiajoissa ongelmaksi muodostui lauhdelämmön hyödyntäminen, ei sen määrä. Lauhdelämpöä on saatavilla, mutta sen lämpötilataso on alikriittisessä kierrossa matala. Ylikriittisenä järjestelmästä saadaan hyvin tehoa ja laitos on kokonaisenergiataloudellisesti paljon energiatehokkaampi kuin perinteinen kylmä-/lämmitysjärjestelmä.

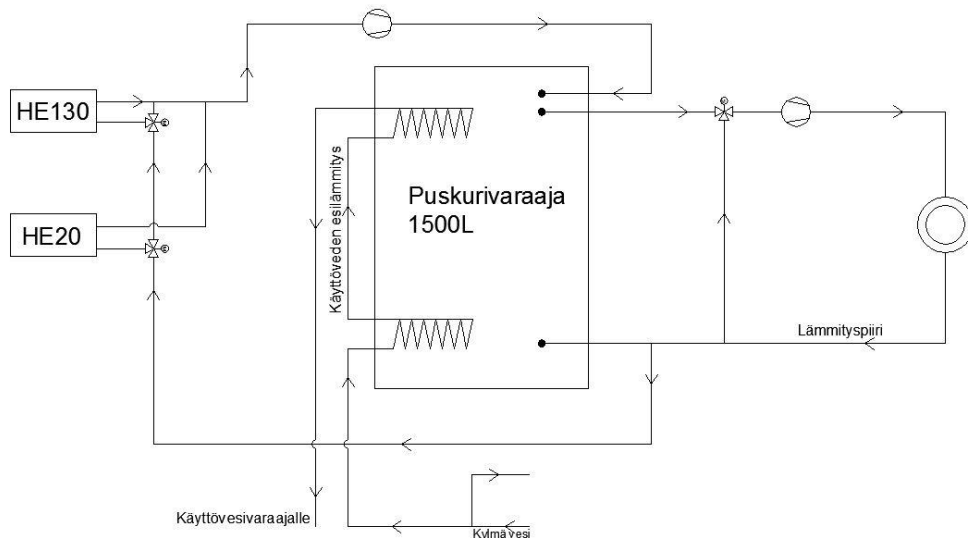
Tällä hetkellä kylmäkoneen toiminta on hyvin epätasaista, kun HE60 on käytössä. Kompressorit ottavat tehopiikkejä aina, kun ulkolämpötila laskee ja lisälämpöä tarvitaan. Tehopiikit johtuvat siitä että HE60-lämmönvaihtimen ohjaus on toteutettu siten, että lisälämmönpyynnin tullessa HE60:n ohitusventtiili aukais-taan täysin auki. Kun tarvittava lämpötilataso on saavutettu lämmityskierrossa, ei HE60:n kautta ajeta ollenkaan kylmäainetta.

5.6.1 Puskurivaraajan kytkentä

Koneikon lisälämmönpyyntiä ohjataan lämmitysverkoston lämpötilaa säättävän venttiilin mukaan. Jos lämmityskierrossa riittää lämpöä, ei lisälämpöä tuoteta

Käytössä olevalla kytkennällä kaikki HE20-lämmönvaihtimella saatu lämpö voi mennä suoraan lämmityskiertoon ja sen takia varaaja ei lämpene.

Ratkaisu tähän ongelmaan olisi HE20:n kytkennän muuttaminen suoraan varaajaan (Kuvio 19). Jos HE20 olisi kytketty kuviossa esitetyllä tavalla, niin lämpö tulisi aina suoraan varaajaan, eikä tarpeettomasti lämmityskiertoon ja sitä kautta lämmittäisi HE20:lle menevää vettä. Lämpöä olisi kuitenkin aina tarvittaessa saatavissa varaajan yläosassa. Turhaa lisälämmönpyyntiä ei tulisi ja koneikolla olisi aina tieto lämmitysjärjestelmässä olevasta lämpötilatasosta.



Kuvio 19. Kytkenä suoraan varaajaan

5.6.2 Ovipuhaltimien säätöventtiilit

Myymälässä on kolme ovipuhallinta. Myymälän tuulikaapissa on kaksi ovipuhallinta ja lastauslaiturin ovella yksi. Ovipuhaltimia ohjataan tuulikaapin ja lastauslaiturin lämpötilojen mukaan ja puhaltimet lähtevät päälle kun lämpötila laskee raja-arvon alle. Ovipuhaltimet on kytketty samaan lämmönjakokiertoon lattialämmityksen kanssa.

Ovipuhaltimien virtausta säädetään magneettiventtiileillä. Magneettiventtiilit aukeavat, kun puhaltimet lähtevät päälle ja menevät kiinni, kun puhaltimet sam-

muovat. Koska virtaus on mitoitettu kylmimpien ilmojen mukaan, puhaltimien läpi virtaava vesi ei jäähdy tarpeeksi lauhemmillä ilmoilla. Puhaltimilta palaava vesi on kytketty samaan linjaan lattialämmityksen kanssa, joten puhaltimien kautta paluulinjaan pääsee tarpeettomasti lämmintä vettä. Kun lämmityskierron paluulinjan lämpötila nousee, aiheuttaa se edellä kuvattuja ongelmia LTO:ssa.

Alkutilasta ongelmaksi muodostuikin väärinpäin asennetut magneettiventtiilit ovipuhaltimissa. Magneettiventtiilien ollessa väärinpäin, päästivät ne tarpeettomasti lämmintä vettä puhaltimien läpi. Magneettiventtiilien kääntämisellä olikin vaikutus kylmäjärjestelmän energiatehokkuuteen kuten tämän opinnäytetyön luvussa 5.7.2.

Yksi ratkaisu tähän ongelmaan olisi säätöventtiilien asentaminen ovipuhaltimille menevään vesilinjaan. Säätöventtiilien avulla virtaus voitaisiin säätää siten, että lämmintä vettä ei pääsisi tarpeettomasti lämmityskierron paluulinjaan. Venttiilejä voisi ohjata esimerkiksi ovipuhaltimilta lähtevän veden lämpötilan mukaan.

Toinen ratkaisu olisi kytkeä ovipuhaltimet lämmitysjärjestelmään eri tavalla. Esimerkiksi siten, että ovipuhaltimilta palaava vesi ei liittyisi lattialämmityskierron paluulinjaan. Ovipuhaltimilta palaava vesi voitaisiin kytkeä vaikka lämmitysjärjestelmään menevään linjaan takaisin.

5.6.3 Välilevyllinen puskurivaraaja

Tällä hetkellä käytössä on varaaja, jossa ei ole lämpötilakerrostumaa edistävää välilevyä. Välilevyllä varustettu varaaja muodostaisi mahdollisesti paremmin koneikon toiminnan kannalta oleellisen lämpötilakerrostuman. Välilevyllisessä varaajassa on kaksi erillistä osastoa ja ne on erotettu toisistaan reikälevyllä. Tämä hidastaa varaajan lämpötilaeron sekoittumista aiheuttavia virtauksia. Varsinkin niin sanotuilla väliskeleillä välilevyllinen varaaja olisi hyödyllinen, koska olosuhteet muuttuvat hyvin paljon järjestelmän sisällä.

5.6.4 HE20- ja HE130-lämmönvaihtimien kiertopumpun ohjaus

Tällä hetkellä HE20- ja HE130-lämmönvaihtimien kiertopumppu on mitoitettu siten, että toimiessaan pienimmällä teholla virtaus on noin 0,4-0,5 l/s. HE20-lämmönvaihtimella voitaisiin myös ajatella pumpun taajuusmuuttajaohjausta lämpötilaeron kasvattamiseksi. Tämä ei suoraan pienennä HE20:lle menevän veden lämpötilaa, mutta sillä voitaisiin optimoida virtaus vastaamaan lämmönvaihtimen kaasupuolella olevan lämpötehon määrää.

Mitä vähemmän energiaa kuumakaasussa on saatavilla, sitä pienempi virtaus nestepuolelle tarvitaan. Pienemmällä virtauksella neste ehtii lämmitä enemmän ja näin lämpötilaero pääsee helpommin muodostumaan. Lämmönvaihtimen teho alikriittisenä toimiessa on noin 5kW. Jotta saavutettaisiin 10 °C lämpötilaero, virtauksen tulisi olla noin 0,12 l/s. Liitteessä 5 on tehdyt laskelmat. Tämän hetkinen virtaus on huomattavasti liian suuri. Jos kuitenkin menevän veden lämpötilaa saataisiin pienemmäksi, saataisiin HE20:ltä saatua tehoa kasvatettua ja näin ollen virtaus voisi olla suurempi.

Pumpun taajuusmuuttajaohjaus pienentää myös pumppaamiseen käytetyn sähkön määrää, kun pumppua ei tarvitse aina pyörittää täydellä teholla. Kiertopumppua voisi ohjata esimerkiksi HE20-lämmönvaihtimen meno- ja paluuveden lämpötilaeron mukaan.

5.6.5 HE60-lämmönvaihtimen käyttö

Paineen korotus vaatii plussakompressorien imulinjaan suuremman massavirran, joka saadaan HE60-lämmönvaihtimella viilentämällä maapiiriä. HE60-lämmönvaihtinta ajetaan tällä hetkellä liitteessä 4 näkyvällä tavalla. HE60:n käyttö on epätasaista ja sen teho on aina iso.

Suuria tehopiikkejä kylmäkoneikossa voitaisiin mahdollisesti pienentää ottamalla ohjausviesti HE60-lämmönvaihtimen ohitusventtiilille ulkoilman lämpötilasta. Testeissä huomattiin että koneikon lisälämmönpyynti tulee aina hieman jäljessä

ulkoilman lämpötilaan nähden. Näin ollen jos massavirtaa alettaisiin nostaa HE60:n kautta jo hieman ennen lämmityskierron lämpötilan laskua, suuria piikkejä ei välttämättä tarvittaisi. Kuitenkin jos lämpötila laskee riittävästi oletusarvosta, ajettaisiin HE60-lämmönvaihdinta täydellä teholla.

HE60 lämmönvaihdinta voitaisiin käyttää lineaarisesti noin 0C° ulkolämpötilasta alkaen. Esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa 0C° asetettaisiin EC2 venttiili 5 % auki ja lämpötilan laskiessa -5C° :een aukaistaisiin EC2 venttiili 10 %. Nämä arvot ovat vain esimerkkejä ja todelliset arvot pitäisi testata käytännössä.

5.7 Viitekehyksiä samantyyppisille kylmäjärjestelmille

Tutkimuksissa selvisi tiettyjä arvoja, joita seuraamalla voidaan saada tietoa LTO:n ja koneikon tehokkuudesta. Tässä työssä käsitellään erityisesti laitoksen toimintaa talvella ja siksi seuraavat kohdat käsittelevät koneikon toimintaa talvella.

5.7.1 Lämpötilaero HE20-lämmönvaihtimella

Alkutalvesta tehdyissä testeissä, kun lisälämmöntuotanto ei ollut käytössä, lämpötilaero HE20-lämmönvaihtimella ei ollut kuin 1C° tai vähemmän. Näin energiaa jouduttiin kierrättämään kohdassa 5.7.2 kuvatulla tavalla.

Testeissä huomattiin että 0C° - -5C° ulkolämpötiloilla lämpötilaeroksi riittää noin 4C° . Jo alle -5C° ulkolämpötiloilla koneikko tarvitsee lisälämpöä. Kun massavirtaa kasvatetaan HE60-lämmönvaihtimella ja paine korotetaan noin 83 bar:in, saadaan HE20:n lämpötilaeroa nostettua noin 15C° :een. Jos HE20:lle menevän veden lämpötilaa saataisiin laskettua lisää, isomman osan lämmöstä saisi hyödynnettyä suoraan rakennuksen lämmitykseen.

On tärkeää, että varaajaan syntyy lämpötilakerrostuma ja että lämmitysverkosto ei päästä lämmintä vettä virtaamaan lämmityskierrosta suoraan HE20-

lämmönvaihtimelle lähtevään linjaan. HE20-lämmönvaihtimelle menevän veden lämpötilan tulisikin olla mahdollisimman pieni.

5.7.2 Lämpötila kaasunjäähdyttimen jälkeen

Kaasunjäähdyttimen ja HE40 lämmönvaihtimen jälkeen saavutetulla lämpötilalla on suuri merkitys kylmäkoneen kylmäkertoimeen. Tämän työn kuviossa 16 on havainnollistettu kuinka lauhtumisen loppulämpötila vaikuttaa kylmätehoon, vaikka kompressoreilta vaadittu työ ei muutu.

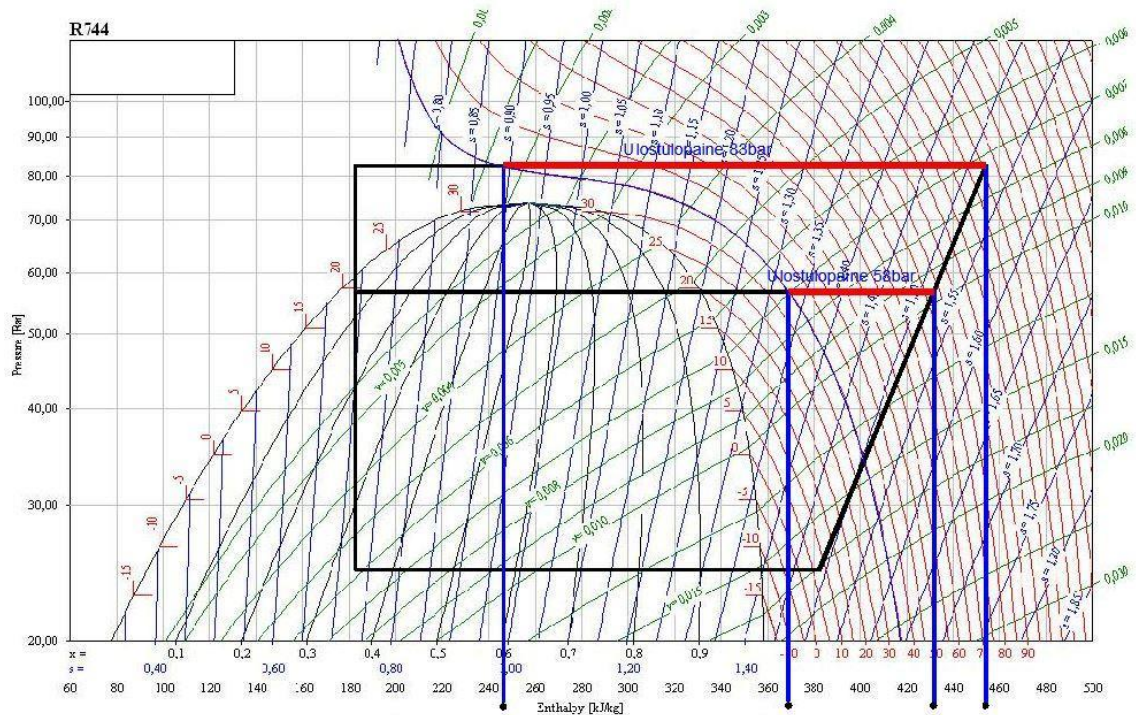
Porakaivot toimivat talvella lämpönieluna erinomaisesti. Porakaivoista tulevan liuoksen lämpötila oli koko talven ajan alle 10 °C ja sen avulla kuumakaasu saatiin jäähtymään lähes poikkeuksetta noin 10 °C lämpötilaan. Kylmäkoneen kylmä COP oli talven ajan 4,5 – 6 välillä. Pakkaspuolen COP oli noin 2.

Vaikka kaivoja ladattiin lähes koko talven ajan 200 – 300 kWh päivässä, ei kaivojen lauhtusteho pienentynyt. Log p, h-piirroksesta katsottuna kaasunjäähdytyksen loppulämpötilan noustessa 10 °C:sta 20 °C:een, jäähdytykseen käytettävä energia pienenee noin 30kJ/kg. Tämä näkyy kylmä COP:n pienenemisenä 4,3:sta 3,75:een. Lauhtumisen loppulämpötilan kasvaminen näkyy nopeasti kylmäkoneen kylmä COP:n huonontumisena.

Porakaivojen ansiosta hiilidioksidikylmäkonetta voidaan ajaa alikriittisenä isomman osan vuodesta, kuin pelkällä ilmaan jäähdyttävällä kaasunjäähdyttimellä varustettua koneikkoa. Kun ulkolämpötila nousee, niin ainoastaan kaasunjäähdyttimellä varustettu laitteisto joutuu nostamaan lauhtumispaineen ja lämpötilan korkeammaksi tarvittavan kylmätehon saamiseksi. Tämä aiheuttaa suurta kylmä COP:n laskua.

5.7.3 Optimaalinen lauhduspaine lisälämmöntuotannossa

Hiilidioksidin ominaisuuksiin kuuluu suuri lauhdutustarve ylikriittisessä kierto-
sessissa. Kuviossa 20 on esitetty lauhdelämmön energiasisällön määrä eri kah-
della eri paineella, kun lauhdetta voidaan hyödyntää 35C° tasolle. Paineen ko-
rotukseen vaatimaan energiaan suhteutettuna hyödynnettävän lauhde-energian
määrä kasvaa huomattavasti.



Kuvio 20. Paineenkorotuksen vaikutus hyödynnettävään energiaan

Kuviossa 20 oleva punainen alue on hyödynnettävää energiaa. Jäähdytispai-
neen ollessa 58 bar:a käytettävissä olevan energian määrä on noin 70kJ/kg.
Jäähdytispaineen ollessa 83bar:ia on käytettävän energian määrä noin
210kJ/kg. Paineen korotus 58bar:in tasolta 83bar:in tasolle ei kuitenkaan lisää
kuumakaasun energiasisältöä kuin noin 25kJ/kg. Käytettävissä olevan energian
määrä johtuu hiilidioksidin termodynaamisista ominaisuuksista, sillä hiilidioksidin
ominaislämpökapasiteetti ja tiheys muuttuu huomattavasti kriittisen pisteen olo-
suhteissa.

Log p,h - diagrammista nähdään, kuinka hiilidioksidilla lämpötilakäyrät kulkevat suhteellisen vaakatasossa kriittisen pisteen yläpuolella. Muilla kylmäaineilla käyrät nousevat huomattavasti jyrkemmin ja paineen korotuksesta ei saada samankaltaista hyötyä. Lämpötilaa kuvaava käyrä alkaa kuitenkin nousta jyrkästi noin 85bar:in kohdalla, joten sen yläpuolelle painetta ei kannatta lämmöntuotantotarkoituksessa nostaa.

Koneikon tehon ja nykyaikaisten kansitettujen kylmäkalusteiden ansiosta kylmäainevirta on hyvin vähäistä normaalitilanteessa talviaikaan. Myymälän kalusteilta tuleva kylmäainevirta on niin pieni, että sen jatkuva paineistaminen 83barin tasolle ei ole järkevää eikä mahdollista. Kompressorin joutuu ”odottelemaan”, että kylmäainetta ehtii kertyä tarpeeksi imulinjaan, jonka jälkeen paine saadaan hetkellisesti 83 barin tasolle. Kylmäainetta ei kuitenkaan riitä ylläpitämään 83 barin tasoa ja lämmöntuotosta tulee katkonaista.

6 POHDINTA

Työ oli hyvin ajankohtainen, koska kaupan kylmäjärjestelmien on pakko kehittyä kasvavien energiatehokkuusvaatimusten edessä. Myös ympäristöystävällisyys ja käyttöturvallisuus on nykyisin otettava huomioon. Hiilidioksidi täyttää tällä hetkellä parhaiten kylmäaineille asetetut vaatimukset. Hiilidioksidi on huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin epäorgaaniset kylmäaineet. Ympäristöystävällisyyden lisäksi hiilidioksidi sopii hyvin käytettäväksi elintarvikkeiden kanssa, koska se on oikein käytettynä myrkytöntä. Hiilidioksidin saatavuus on myös hyvä ja se on verrattain halpaa.

Hiilidioksidi ei ole uusi kylmäaine, mutta uusien innovaatioiden myötä ja tekniikan kehittyessä sen mahdollisuudet ovat kasvaneet ja lisääntyvät. Kaupan kylmässä hiilidioksidi on tulevaisuuden kylmäaine ja sitä käytetään jo useimmissa uusissa myymälöissä. Myös saneerauskohteissa siirrytään vanhoista kylmäaineista hiilidioksidin käyttöön. Hiilidioksidin käyttöä puoltaa myös se, että vanhoja epäorgaanisia kylmäaineita lisätään koko ajan kiellettyjen aineiden listalle. Nykyaikaisilla lämmöntalteenottoratkaisuilla ja korkeita paineita kestävillä komponenteilla hiilidioksidikylmälaitoksesta pystytään rakentamaan energiatehokkaampi kuin perinteisestä kylmälaitoksesta, kuten tästä opinnäytetyöstä käy ilmi.

Tässä työssä oli tarkoituksena saada kylmäjärjestelmästä tehtyjen oletusten tueksi faktatietoa. Oletuksena oli, että järjestelmä on karkeasti arvioituna puolet energiatehokkaampi kuin perinteinen kylmä- ja lämmitysjärjestelmä. Väitteelle saatiin toivottua vahvistusta. Karkeasti arvioituna koneikko pystyy tuottamaan kylmää ja lämpöä myymälän tarpeisiin optimiolosuhteissa ja kaiken ollessa kunnossa jopa alle puolella siitä sähkömäärästä, jota perinteinen järjestelmä käyttäisi. Järjestelmä on noin 20 % kalliimpi hankkia kuin perinteinen järjestelmä, mutta lisäinvestointi maksaa itsensä takaisin hyvin nopeasti energiatehokkuudellaan.

Järjestelmän energiatehokkuuden ansiosta järjestelmälle voisi toivoa jonkinlaista yhteiskunnallista tukea. Esimerkiksi hankintahinnasta jokin osa voisi olla tuettavissa. Tulevaisuuden kannalta energiaa ja ympäristöä säästäviä ratkaisuja tuetaan tälläkin hetkellä. Tässä työssä tutkimuskohteena ollut järjestelmä on kiistatta näitä arvoja suosivaa tekniikkaa, joten sille voisi toivoa jonkinlaista tukijärjestelmää.

Seurannassa paljastui, että lämmönjaon tehokkuus ja oikea toiminta on erittäin tärkeää energiakeskuksen kokonaisenergiatalouden kannalta. Järjestelmässä on useita komponentteja, joiden väärällä mitoituksella tai huolimattomalla asennuksella on järjestelmän energiatehokkuuteen voimakkaita negatiivisia vaikutuksia.

Tutkimuskohteena olevan kylmäjärjestelmän tekniikka vaatii monialaista osaamista. Laitteiston suunnittelu ja rakentaminen vaatii työntekijöiltä paljon osaamista ja siksi pienien virheiden mahdollisuus kasvaa. Kylmäkoneessa on kylmätekniikan lisäksi paljon sähkö- ja automaatiotekniikka sekä ohjelmistotekniikkaa. Lisäksi kylmäjärjestelmän yhteyteen tulee kiinteistön LVI-tekniikka, jonka suunnittelussa täytyy huomioida kylmätekniikan vaatimukset. Laitteiston suunnittelu vaatii näiden kaikkien yhteensovittamista ja se voi olla käytännössä hyvinkin haasteellista.

Hiilidioksidilaitosten kasvavan kysynnän vuoksi ammattitaitoisia työntekijöitä voi olla vaikea löytää, ja laitteiston toimintaa ei usein ehditä seurata valmistumisen jälkeen. Kun seurantaan ei ole resursseja, järjestelmä voi kuluttaa huomattavan paljon energiaa pienen virheen takia. Tutkimuskohteena olevassa kylmäjärjestelmässä yksinkertaisella magneettiventtiilien kääntämisellä saatiin huomattavia energiasäästöjä.

Laitteistoon asennetut mittaukset ovat edelleen toiminnassa ja niillä on tarkoitus kesän aikana tehdä lisää testiajoja. Kesällä mielenkiintoisia testikohteita ovat porakaivojen kaasunjäähdytyskapasiteetti ja sen raja-arvot. Myös porakaivojen lämpenemistä olisi hyvä seurata ja tarkastella, kuinka lämpimiksi niitä voidaan

lämmittää, jotta syksyllä porakaivojen maaliuosta voidaan käyttää ilman kuiva-
tukseen. Kesäaikaan voisi testata myös HE50-lämmönvaihtimen todellista vai-
kutusta järjestelmän kylmä COP:iin.

Järjestelmän käyttömahdollisuudet ovat erittäin laajat. Kyseisenlaista tekniikkaa
voitaisiin ajatella käytettävän miltei missä tahansa kohteessa, jossa tarvitaan
kylmän lisäksi lämpöä. Jäähallit ovat hyvä esimerkki tästä. Järjestelmän mah-
dollisuudet ovat suuret, mutta se vaatii vielä lisää tutkimuksia sekä erilaisia käy-
tännön sovellutuksia erilaisissa ympäristöissä.

Jetitek Oy:ltä olen saanut todella hyvää materiaalia ja opastusta hiilidioksidikyl-
mästä. Opinnäytetyöprosessi oli minulle erittäin opettavainen ja olenkin oppinut
talven aikana todella paljon käytännön kylmätekniikasta ja siihen liittyvästä säh-
kö- ja automaatiotekniikasta. Opinnäytetyössä käsiteltiin suuri määrä dataa ja
sen käsittely oli aikaa vaativaa työtä. Opinnäytetyön alussa perehtyminen nyky-
aikaiseen kylmätekniikkaan oli mielenkiintoista, mutta se vaati suuren itsenäisen
työpanoksen.

LÄHTEET

Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. Viitattu 10.4.2015

<http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/hygieniaosaaminen/tietopaketti/elintarvikkeiden+hygieeninen+kasittely/elintarvikkeiden+pakastaminen>

Espo, P. 2014. Pienen myymälän hiilidioksidikylmän lämmöntalteenotto. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö.

Jetitek Oy 2014. Viitattu 1.10.2014 <http://www.jetitek.fi/>.

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2006. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Manner, K. 2013. Hiilidioksidikylmälaitoksen ja maalämpöjärjestelmän optimointi liikennemyymälässä. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiateknikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Motiva, 2012. Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto. Viitattu 10.4.2015

http://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_jarjestelmien_lauhdellammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf

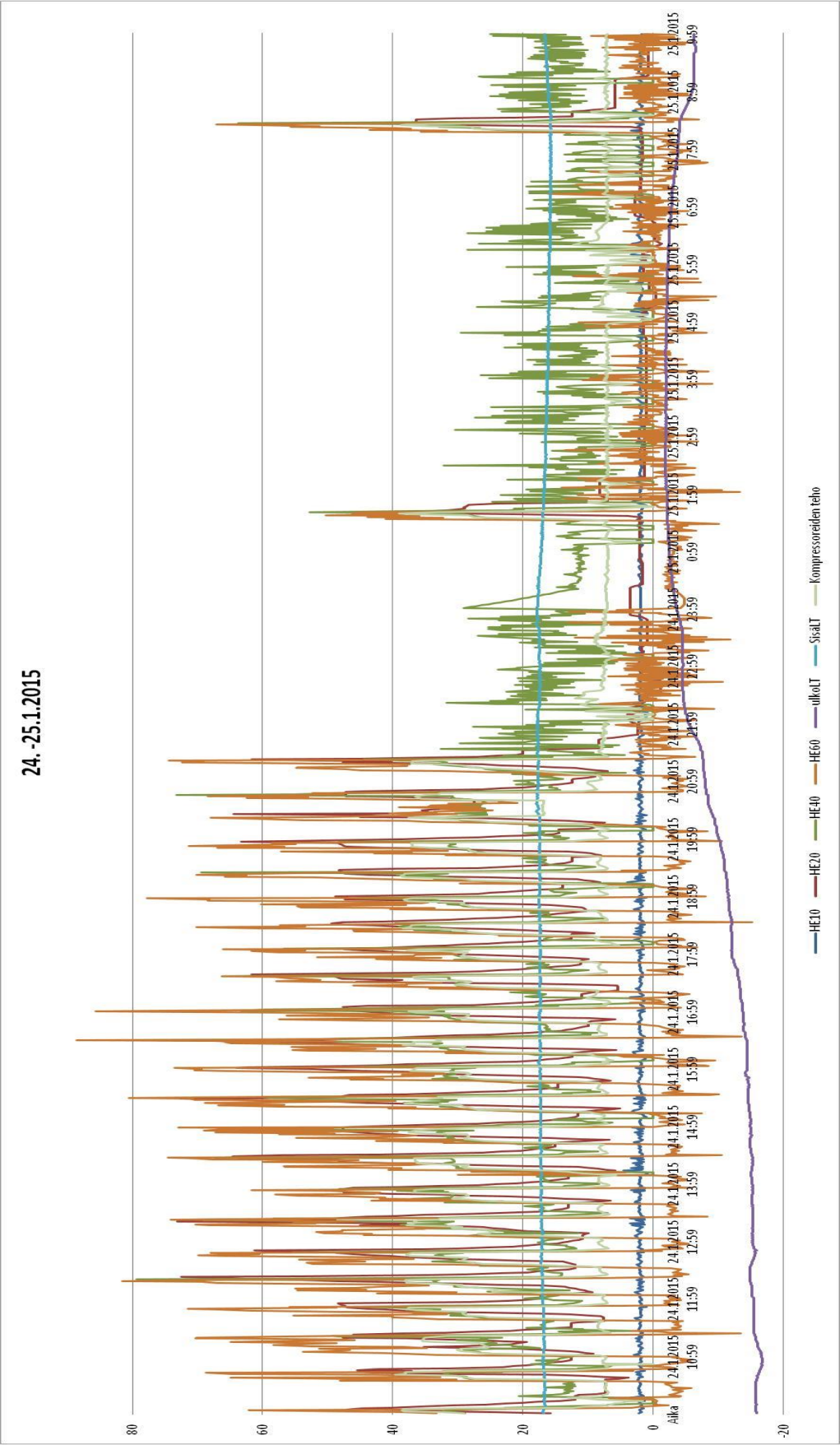
Peltola, T. 2013. Hiilidioksidia kylmäaineena käyttävien markettien lämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

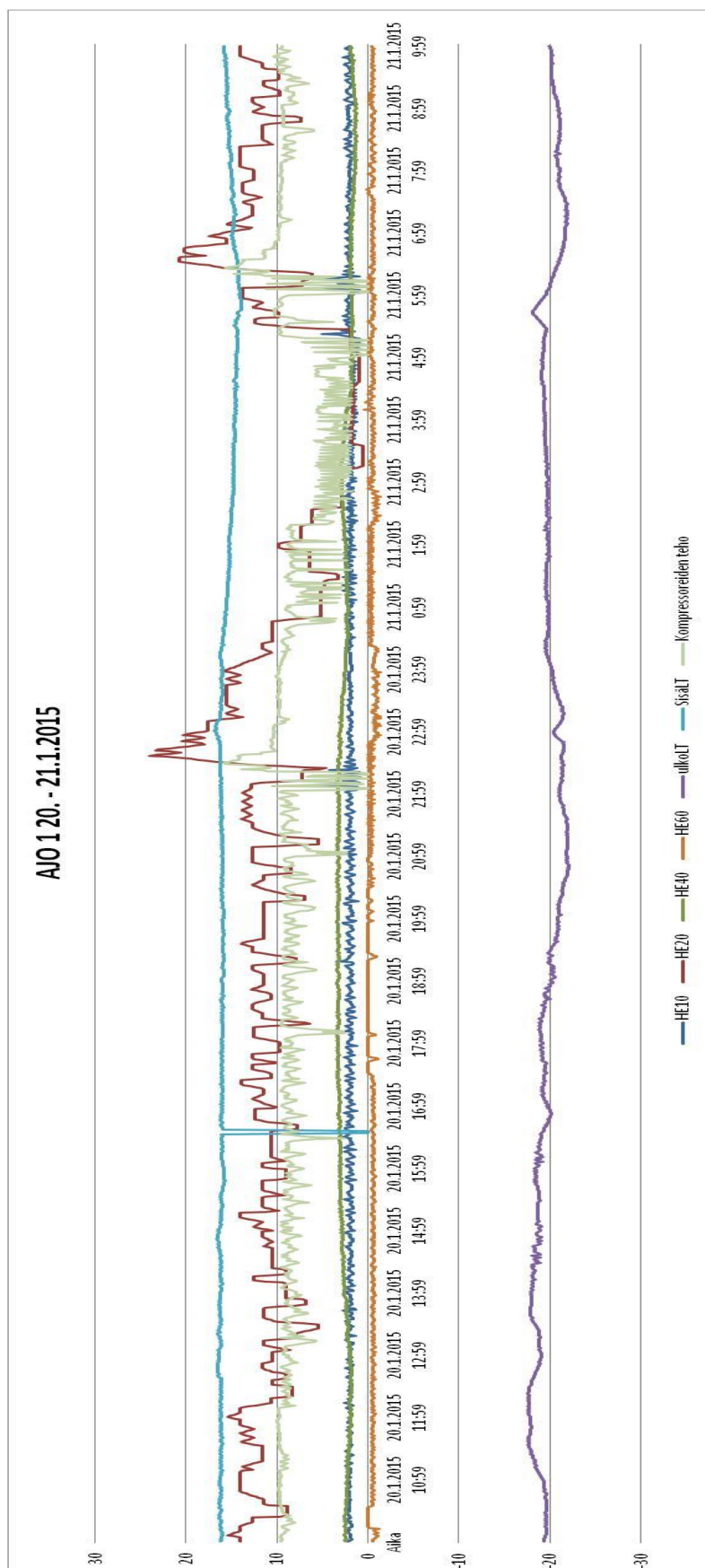
Sawalha, S. 2008. Carbon Dioxide in Supermarket Refrigeration. Royal Institute of Technology. Department of Energy Technology. Doctoral Thesis.

LIITTEET

- Liite 1. Diagrammi, Magneettiventtiilit väärinpäin
- Liite 2. Diagrammi, Riittämätön massavirta, Ajo 1
- Liite 3. Diagrammi, Lisälämmöntuotanto, Ajo 2- ja oletusasetuksilla
- Liite 4. Diagrammi, koneikon toiminta oletusasetuksilla

Liite 1





Liite 3

